

ÉCOLE DOCTORALE
ENERGIE MATERIAUX SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Centre de Recherche sur la Matière divisée (FRE 3520)

THÈSE présentée par :
Sarah Janvier-Badosa

Soutenue le **18 décembre 2012**

Pour obtenir le grade de **Docteur de l'université d'Orléans**
Spécialité Génie Civil

Le carnet de santé d'un monument
Application au château de Chambord

THÈSE dirigée par :

Muzahim Al-Mukhtar Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Ginette Arliguie Professeur, Université de Toulouse
Anne Pantet Professeur, Université du Havre

JURY :

Dashnor Hoxha	Professeur, Université d'Orléans, Président du jury
Ginette Arliguie	Professeur, Université de Toulouse
Anne Pantet	Professeur, Université du Havre
Philippe Bromblet	Ingénieur de Recherche au CICRP, Marseille
Luc Forlivesi	Conservateur, Directeur du patrimoine du domaine national de Chambord
Muzahim Al-Mukhtar	Professeur, Université d'Orléans
Kévin Beck	Maitre de Conférences, Université d'Orléans
Xavier Brunetaud	Maitre de Conférences, Université d'Orléans

« J'ai visité hier Chambord. Vous ne pouvez vous figurer comme c'est singulièrement beau. Toutes les magies, toutes les poésies, toutes les folies même sont représentées dans l'admirable bizarrerie de ce palais de fées et de chevaliers ».

Victor Hugo à Adolphe De Saint-Valry
Blois, 7 mai 1825

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée au CRMD (Centre de Recherche du la Matière Divisée), dont je remercie les directrices successives Marie-Louise Saboungi et Sylvie Bonnamy, qui m'y ont accueillie durant ces trois années.

Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de thèse, Muzahim Al-Mukhtar, sans qui cette aventure n'aurait pas pu avoir lieu ! Il m'a accordé sa confiance, il m'a acceptée dans l'équipe sans préjugés sur ma formation atypique, et je lui en suis extrêmement reconnaissante. Je le remercie aussi de m'avoir permis d'élargir mon sujet de thèse à tous les aspects de la conservation-restauration du patrimoine, vers une problématique originale, qui est l'exact reflet de mon parcours professionnel et personnel. Merci infiniment aussi à mes deux encadrants de thèse, Kévin Beck et Xavier Brunetaud, qui m'ont considérée dès le début comme une collègue, plutôt que comme une étudiante, qui m'ont guidée et orientée durant ces trois années ! Merci à tous les trois pour leur patience et leur amitié.

Je remercie également les membres du jury, d'avoir accepté de lire et de juger ce travail. Je les remercie pour leurs remarques constructives et l'intérêt qu'ils ont porté à mon sujet. Merci à Dashnor Hoxha, d'avoir présidé avec sincérité et simplicité ce jury de thèse, pluridisciplinaire et original. Merci à Ginette Arliguie et Anne Pantet d'avoir été les rapporteurs attentives, curieuses et extrêmement ouvertes de mon manuscrit. Merci à Philippe Bromblet et Luc Forlivesi, pour leur regard professionnel et bienveillant face à ce travail, ainsi que pour leurs encouragements rassurants.

Cette thèse a eu lieu dans le cadre du projet Sacre. Les réunions trimestrielles avec les différents partenaires 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 :

- Dashnor Hoxha, Naima Belayachi, et Duc Phi Do, du laboratoire Prisme (Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Energétique), grâce à

qui j'ai découvert une discipline qu'il ne m'a pas été donné de pratiquer, mais qui est le prolongement de mon travail : la modélisation numérique.

- Jean-Didier Mertz, Mikaël Guiavarc'h et Stéphanie Tournon, du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, dont l'expertise et la pratique ont été précieuses (merci à Mikaël pour la journée intensive de prélèvements !)

- Pascal Thevard, Eric Johannot et Alexandra Fleury, du Domaine national de Chambord, qui m'ont fait tour à tour découvrir les différents aspects du château, et avec qui j'ai adoré discuter, partager expériences et connaissances. La liberté de déplacement et d'action que j'ai eue au château m'a permis d'avancer en toute quiétude dans mon travail, que ce soit pour scruter les parements, prélever des échantillons ou réaliser des scans 3D, et je leur en suis reconnaissante.

- Livio de Luca et Chiara Stefani, du MAP-Gamsau (Groupe de recherche pour l'Application des Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme) qui m'ont accueillie quelques semaines à Marseille, et m'ont fait découvrir un nouvel aspect de ma problématique : la 3D et ses promesses !

J'exprime toute ma gratitude à tous ceux qui ont contribué à mon enquête archivistique, en premier lieu Eric Johannot, à Chambord, puis Simon Bryant, archéologue à l'INRAP, pour leurs conseils et orientations, ainsi que les discussions très enrichissantes que nous avons eues. Je remercie aussi toutes les institutions qui m'ont toujours réservé un accueil chaleureux et efficace face à mes demandes variées, me permettant de réunir ces données éparpillées : les archives départementales du Loir-et-Cher, les archives départementales du Loiret (fonds ancien et contemporain), le service de la documentation de la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la Région Centre, la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, l'Institut National d'Histoire de l'Art, la Bibliothèque de l'École du Louvre, et le service de la documentation du LRMH.

Je remercie ceux qui m'ont gracieusement accueillie pour réaliser les expériences qui manquaient au laboratoire. Grâce à Céline Schneider et Vincent Barbin, j'ai pu utiliser le microscope électronique à balayage du Gegenaa à Reims, et grâce à Fabrice Muller, j'ai pu réaliser à la dernière minute des analyses en Diffraction de Rayons X à l'ISTO, lorsque l'appareil du laboratoire était en panne, juste avant de partir en colloque ! Les analyses réalisées au Centre de Microscopie Electronique de la fac avec Annie Richard, m'ont aussi été d'une aide précieuse. Et merci enfin à Névila Jozja et surtout à Audrey Guirimand-Dufour

pour les analyses en chromatographie ionique réalisées avec efficacité et rapidité malgré les délais très serrés !

Je tenais à remercier ceux qui m'ont dépannée, aidée et conseillée au sein du laboratoire, Sandrine Delpeux et Christiane Pipeau pour leurs conseils en chimie et leur aide technique, Jérôme Chancolon pour l'accès aux microscopes et au profilomètre, et Philippe Badets pour les montages de manip et les bricolages de dernière minute (et les innombrables dépannages automobiles !). Merci surtout à Alain Pineau pour toutes les aventures, rebondissements et émotions vécus à cause du capricieux mais précieux diffractomètre de rayons X du laboratoire !

Je voudrais également exprimer ma gratitude à Katia Baslé et Floréal Daniel, qui m'ont encouragée à m'aventurer sur le chemin de la conservation du patrimoine, et qui m'ont permis d'affiner et d'affirmer mes goûts et mes choix professionnels.

Merci de tout cœur à mes parents, qui, aussi loin que je m'en souviens, n'ont jamais émis le moindre doute face aux voies que j'ai empruntées. Ils m'ont toujours poussée à faire ce que j'aimais avant tout. Merci tout spécialement à ma maman, qui a relu et corrigé avec patience et curiosité mon manuscrit !

Merci à ceux qui sont toujours présents, de près ou de loin depuis longtemps ou moins longtemps ! Mehdi, Carelle, Chloé, Aurore, ils sont là depuis toujours ou presque ! Laure, Marion, Ziad, Laetitia, Andrea, Gwen, on a été dans le même bateau ! Laura, Julie (copines de galère !), Kévin, Xavier, Audrey, Sandrine, Mika, Marx, Jackie, Guillaume, Adrien, Célia, Charlotte, Charles, Maxime, merci à eux pour les expériences cinématographiques, les barbecues, les surprises, et tout ce qu'on a partagé ces dernières années ! Merci à Gritoun', à la fois exutoire, source d'inspiration, et objet de tendresse.

Enfin, merci à Romain, mon Dou', pour son amour constant, son soutien et ses encouragements, sa confiance en moi et en mes capacités, qui ont rendu ces épreuves plus faciles, plus sereines, et heureuses.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
 Chapitre 1	
Méthodologie de conception du carnet de santé.....	8
 1. Le château et les façades étudiées	9
1.1. Localisation et description.....	9
1.2. Terminologie et composition.....	10
 2. Le récolement des données.....	12
2.1. Sources écrites	12
2.2. Sources iconographiques	14
2.3. Observations de terrain.....	15
2.4. Remarques et avertissements	19
 3. La démarche illustrative	21
3.1. Construction du support.....	21
3.2. Représentation des données.....	25
3.3. Analyse statistique des données	28
 4. Conclusion.....	30

Chapitre 2

Données du passé du monument	31
1. Historique de la construction du château	32
1.1. Construction sous François I ^{er}	33
1.2. Aménagements jusqu'à la Révolution Française	38
1.3. Travaux de la Révolution Française à la fin de la première guerre mondiale.....	41
1.4. Restaurations du XX ^e siècle.....	45
2. Construction et restauration des façades étudiées	50
2.1. L'aile Sud.....	51
2.1.1. Au XVI ^e siècle	51
2.1.2. Au XVII ^e siècle.....	53
2.1.3. Aux XVIII ^e et XIX ^e siècles.....	57
2.1.4. Aux XX ^e et XXI ^e siècles	60
2.2. La tour du Chaudron.....	66
2.2.1. Réaménagements intérieurs et conséquences sur les percements des façades....	66
2.2.2. Restaurations des parements	71
3. Analyse graphique et statistique des pierres employées et discussion	77
3.1. Critique d'authenticité	78
3.2. Relevé des natures de pierres	82
4. Conclusion.....	89

Chapitre 3

Données de l'état actuel du monument	90
1. Examen des façades.....	91
1.1. Données environnementales	91
1.1.1. Orientation générale des façades	91
1.1.2. Données météorologiques	93
1.2. Altérations des pierres en place	97
1.2.1. Contexte	97
1.2.2. Altérations chromatiques et dépôts.....	98
1.2.3. Colonisations biologiques.....	99
1.2.4. Figures induites par une perte de matière	101
1.2.5. Fissures et déformations	102
1.2.6. Détachements.....	102
2. Distribution spatiale des altérations	104
2.1. Localisation des altérations sur les façades	105
2.1.1. Colonisations biologiques.....	106
2.1.2. Cassures et détachements	109
2.2. Analyse statistique de la répartition des altérations.....	111
3. Conclusion.....	114

Chapitre 4

Temporalité et estimation de l'évolution des altérations	116
1. Les altérations à Chambord jusqu'en 1900, d'après les textes et les gravures.....	117
1.1. Chronologie	117
1.1.1. Travaux jusqu'à la fin du XVII ^e siècle.....	117
1.1.2. Restaurations à partir du XVIII ^e siècle	119
1.2. Dédutions.....	121
2. Les altérations à Chambord à partir du XX^e siècle, d'après les photographies et les observations	124
2.1. Apport de la photographie	124
2.2. Colonisations biologiques.....	127
2.3. Desquamations en feuillets.....	130
2.4. Desquamations en plaques	131
2.4.1. Détection de la fissure et méthodes de surveillance	131
2.4.2. Apparition de la plaque	132
2.4.3. Observations sur la cinétique de développement d'une plaque.....	135
2.4.4. Apparition ou développement de la fissure : implication d'éléments perturbateurs ?.....	136
2.4.4.1. Remplacements de pierres.....	136
2.4.4.2. Percements de baies	137
3. Conclusion.....	141

Chapitre 5

Diagnostic des desquamations en plaques et en feuillets 145

1. Le phénomène de desquamation en plaques – état de l’art 146

- 1.1. Le tuffeau et ses propriétés..... 146
- 1.2. Hypothèses de propositions de mécanismes de formation de la desquamation en plaques 148
 - 1.2.1. La dissolution des minéraux et les modifications texturales..... 148
 - 1.2.2. Les dilatations thermo-hydriques et le rôle des minéraux argileux..... 149
 - 1.2.3. Le cas du gel 150
 - 1.2.4. Présence de minéraux exogènes 151

2. Caractérisation des desquamations en plaques.....154

- 2.1. Campagnes de prélèvements 154
 - 2.1.1. Choix de la zone..... 154
 - 2.1.2. Échantillonnage..... 155
- 2.2. Analyse physico-chimique et texturale..... 158
 - 2.2.1. Analyse des surface desquamées et non desquamées 158
 - 2.2.1.1. Diffraction de rayons X..... 158
 - 2.2.1.2. Microscopie électronique à balayage..... 160
 - 2.2.2. Analyse du profil selon la profondeur 162
 - 2.2.2.1. Diffraction de rayons X..... 163
 - 2.2.2.2. Chromatographie ionique..... 164
 - 2.2.2.3. Microscopie électronique à balayage..... 166
- 2.3. Analyses complémentaires..... 167
 - 2.3.1. Localisation des prélèvements complémentaires 168
 - 2.3.2. Analyse de la présence et de la localisation du gypse..... 170
- 2.4. Bilan sur la caractérisation de la desquamation en plaques..... 171
- 2.5. Questionnements sur le rôle de la compatibilité pierre de Richemont/pierre de tuffeau dans le phénomène de desquamation en plaques 172

3. Un autre exemple d'altération : les desquamations en feuillets	173
3.1. État de l'art.....	173
3.2. Localisation des prélèvements	175
3.3. Analyse des résultats et discussion	176
 4. Le gypse dans les formes d'altération observées	 179
4.1. Origine possible du gypse : la pollution atmosphérique	179
4.1.1. L'état actuel de la pollution à Chambord	180
4.1.2. Chronologie et présence de gypse : indice d'une pollution ancienne ?	181
4.2. Autres provenances possibles des sulfates à l'échelle de la pierre	183
4.2.1. Des sources naturelles	183
4.2.1.1. La pyrite	183
4.2.1.2. Les colonisations biologiques	184
4.2.2. Des sources anthropiques.....	186
4.3. Bilan sur l'origine du gypse.....	187
 5. Conclusion.....	 189

Chapitre 6

Le gypse dans le phénomène de desquamation – Simulation expérimentale 191

1. Propriétés du gypse en relation avec la pierre 192

1.1. Les mécanismes de formation du gypse et la relation pierre/atmosphère	193
1.1.1. Les réactions chimiques de formation du gypse	193
1.1.2. Les formes de dépôt	194
1.1.3. Vérifications expérimentales des formes de dépôt	196
1.1.3.1. Formation de gypse à partir des eaux de pluie acides (voie humide)	196
1.1.3.2. Formation de gypse à partir du dioxyde de soufre atmosphérique (voie sèche)	197
1.2. Caractéristiques principales du gypse	198
1.2.1. Solubilité	199
1.2.2. Cristallisation	199
1.2.3. Mobilité	200
1.3. Les formes et les cinétiques de dépôts dans les tests de sulfatation – État de l'art	202

2. Tests en laboratoire 204

2.1. Protocoles appliqués	204
2.1.1. Sources de polluants et modes de pénétration des polluants	205
2.1.2. Préparation de l'échantillon, protocole d'imbibition/séchage	207
2.1.3. Succession des cycles et suivi de l'altération	210
2.2. Résultats expérimentaux	212
2.2.1. Observations	212
2.2.1.1. Constats visuels	212
2.2.1.2. Cinétique d'imbibition	213
2.2.2. Modifications texturales de l'état de surface	214
2.2.3. Corrélation entre prise de masse et formation de gypse – Influence du mode d'apport de polluant	217
2.2.3.1. Mode d'apport de soufre	218
2.2.3.2. Le cas du SO ₂	223

2.2.4.	Corrélation entre prise de masse et formation de gypse – Influence des paramètres de séchage et de fissuration de l'échantillon	224
2.2.4.1.	Influence du mode d'isolation lors du séchage	224
2.2.4.2.	Influence de la morphologie de la fissure pré-existante.....	227
2.2.5.	Synthèse.....	230
3.	Le rôle du gypse dans la desquamation en plaques : une hypothèse crédible ? .	232
3.1.	Comparaison vieillissement naturel/vieillissement en laboratoire	232
3.1.1.	Discrimination de la source de polluant en soufre	232
3.1.2.	Mécanisme probable de formation du gypse à cœur par dépôt sec de SO ₂ et imbibition.....	234
3.2.	Proposition de mécanismes de formation de la plaque.....	236
3.2.1.	Évaluation des hypothèses de formation de la fissure	236
3.2.2.	Les scénarii possibles.....	238
4.	Conclusion.....	241

Chapitre 7

Perspectives : vers l'établissement d'un carnet de santé numérique	243
1. Réalisation du support 3D	244
1.1. La photomodélisation	244
1.2. La lasergrammétrie.....	245
2. Organisation et gestion des données : NUBES	247
2.1. Présentation de l'outil.....	247
2.2. Choix techniques.....	249
3. Apport de cette nouvelle méthodologie	251
4. Conclusion.....	254

Conclusion générale	255
Références	262
Liste des tableaux.....	277
Liste des figures	278
Annexes	283
Annexe 1 : Lexique des termes architecturaux employés	284
Annexe 2 : Les sources	287
2.1. Liste des sources écrites.....	287
2.2. Liste des sources iconographiques.....	290
Annexe 3 : Les carrières exploitées.....	293
3.1. Tableau récapitulatif des carrières exploitées pour la construction et les restaurations de Chambord depuis le XVI ^e siècle.....	293
3.2. Tableau des caractéristiques des principales natures de pierres employées sur les parties étudiées	295
Annexe 4 : Cartographies de l'aile Sud et de la tour du Chaudron	296
4.1. Cartographies de datation des pierres	297
4.2. Cartographies de provenance des pierres	299
4.3. Cartographies d'altérations.....	301
Annexe 5 : Vérifications complémentaires en Diffraction de Rayons X.....	303
Annexe 6 : Protocole de chromatographie ionique	305

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le travail abordé dans ce mémoire de thèse traite de la sauvegarde de notre héritage culturel et vise à apporter des éléments novateurs pour mieux comprendre, anticiper et gérer son vieillissement.

Ce travail repose sur une démarche transdisciplinaire sollicitant les sciences humaines et les sciences dures, avec une approche à la fois naturaliste et déterministe, pour tenter de répondre aux enjeux de la conservation-restauration du patrimoine.

1. LA PROBLÉMATIQUE DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE

On confond bien souvent les notions de « conservation » et de « restauration ». En effet, la conservation relève d'une action générale, indirecte, sur un objet ou l'ensemble d'une collection. Elle intervient uniquement si la pérennité d'une œuvre est menacée. À l'inverse, la restauration est une action ponctuelle sur l'œuvre qui n'est pas en péril et ceci afin d'aider à sa compréhension. La restauration est une des étapes du processus de conservation (Mohen, 1999).

Il existe deux types de conservation. La conservation préventive intervient s'il y a risque de perte d'information. On agit davantage sur les causes de la dégradation que sur l'objet lui-même, afin de diminuer les risques d'altération future. La conservation curative permet de traiter les effets de cette dégradation sur l'œuvre pour la rendre à nouveau saine. L'acte de conservation est obligatoire pour la survie d'un monument. Dans le cadre des monuments historiques, la conservation préventive n'est pas toujours appliquée, car les habitudes de restauration perdurent : on remplace des pierres altérées par de nouvelles, à l'identique. Ce sont pourtant la connaissance des matériaux et de leur histoire, l'identification des causes de l'altération et l'amélioration des conditions de conservation qui devraient constituer les étapes

de l'entretien d'un monument (Ponsot, 2003). Mais qu'il s'agisse de la conservation ou de la restauration, toutes deux répondent à des critères déontologiques. Les interventions que vont subir les objets doivent être minimales. La notion d'authenticité d'une œuvre d'art est primordiale. En effet, seul un travail bien documenté permet de protéger un édifice ou de le restituer avec honnêteté en respectant son intégrité.

Le premier critère de la conservation-restauration énoncé par Cesare Brandi (1963) est la stabilité dans le temps, la pérennité, notion à laquelle va répondre la conservation préventive et curative. Un autre aspect important est la réversibilité. Si les interventions de restauration et de conservation préventive vont répondre à ce critère, la conservation curative est rarement réversible, et dans le cadre des monuments historiques en pierre, presque inexistante. Enfin, la restauration répond à un souci de lisibilité, tant sur le plan historique qu'esthétique.

Un certain nombre d'outils sont à disposition du conservateur, pour permettre la mise en œuvre de ces critères et de cette déontologie dans l'action de préservation du patrimoine. L'un de ces outils est le carnet de santé du monument, dont l'élaboration préalable à toute opération de restauration permet de gérer en connaissance de cause les contraintes matérielles et financières qui lui sont liées.

2. LE CARNET DE SANTE

Le projet SACRE pour « Suivi des Altérations, Caractérisation et REstauration des monuments en pierre calcaire » est un projet de recherche piloté par le CRMD, et financé par la région Centre entre 2008 et 2012. Il a pour but premier de fournir aux maîtres d'ouvrage un outil d'aide à la décision pour une programmation rationnelle des opérations de restauration du patrimoine bâti. Un deuxième objectif de ce projet consiste à valoriser ces recherches auprès du grand public en projetant une image des travaux de restauration, non pas comme un mal nécessaire, mais comme une valeur ajoutée à l'ouvrage.

Les données recueillies au cours de l'étude servent à référencer toutes les informations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic détaillé de l'état d'altération de l'ouvrage, de la localisation des dégradations aux conditions météorologiques, en passant par les archives historiques et architecturales. La caractérisation des altérations du tuffeau et la compréhension de ces mécanismes d'altération est un des volets de ce projet, servant de base à la simulation numérique des processus d'altération et donc à la prédiction de l'évolution des altérations.

Toutes ces informations sont représentées sur un modèle 3D du monument, et organisées dans une base de données internet, l'ensemble constituant le carnet de santé du monument.

Cette thèse s'insère dans le projet SACRE, avec pour ambition de traiter les points relatifs au renseignement du carnet de santé et à la simulation expérimentale du vieillissement, pour aboutir à une première analyse holistique de ce carnet de santé, une manière d'appréhender le diagnostic d'altération.

La notion de carnet de santé d'un monument est une analogie avec le vocabulaire médical, dont le but est de traiter de manière scientifique les aspects liés à l'état de santé du monument, son hygiène et ses traitements/opérations en cours et à venir, c'est-à-dire l'altération, la conservation et la restauration. Le carnet de santé est à la fois le support et le résultat du diagnostic d'ouvrage, tel que défini par Fitzner (2002) et Smith et Prikryl (2007). L'enjeu est de synthétiser notre connaissance du passé, du présent, et ce que nous pouvons prévoir de son avenir.

La notion de carnet de santé numérique, par extension, tire parti des technologies numériques pour améliorer les potentialités du carnet de santé : le rendre plus précis, compatible avec tout type de document, plus facile à renseigner et à mettre à jour, analysable de manière quantitative, et finalement utilisable par le plus grand nombre (Brunetaud *et al.*, 2012a, et 2012). Cet aspect numérique tient principalement aux technologies d'acquisition 3D (scanner laser ou photomodélisation), à la structuration des données (base de données à référencement 3D s'appuyant sur un modèle 3D descriptif du monument), et à la solution d'exploitation et de visualisation (interface web gratuite et libre, consultable par tous).

Si le carnet de santé numérique, produit final du projet SACRE, bénéficie de toutes les avancées du travail présenté dans ce manuscrit, cette thèse s'est appuyée sur un support préliminaire simplifié. C'est d'ailleurs cette étape intermédiaire qui a permis de dresser le cahier des charges de l'actuel carnet de santé numérique. Les technologies d'acquisition 3D, la base de données à référencement spatial et l'interface web seront abordées comme des améliorations désormais disponibles, mais non directement exploitées. La pleine utilisation des différentes fonctionnalités rendues possibles par le carnet de santé numérique fera l'objet d'études complémentaires au-delà de cette thèse.

3. OBJECTIFS ET ENJEUX

Cette thèse a pour but de répondre aux questions suivantes :

- Comment réalise-t-on le carnet de santé d'un monument ?
- Quelles sont les données le constituant ?
- Où les trouver ?
- Comment les organiser et les traiter ?
- Comment étayer le diagnostic d'altération ?
- Comment analyser le carnet de santé ?
- Que peut apporter l'expérimentation en laboratoire ?

L'enjeu est à la fois de montrer comment traiter de manière scientifique un problème pratique lié à la conservation du patrimoine, mais aussi de montrer aux gestionnaires d'ouvrage ce que ce type d'approche peut apporter. Il s'agit donc de convaincre à la fois la communauté académique, et celle du patrimoine bâti, de la pertinence de cette démarche.

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse s'appuient sur la transdisciplinarité : la complexité des études abordées dépasse les cadres disciplinaires élémentaires et implique l'acquisition de compétences transversales aux disciplines. Il s'agit donc d'associer sciences humaines (histoire) et sciences dures (physico-chimie) pour répondre aux préoccupations de la gestion du patrimoine. Contrairement à la simple juxtaposition de résultats ou de points de vue issus de plusieurs disciplines, l'enjeu est de démontrer que ces disciplines se questionnent mutuellement et se complètent pour appréhender des problèmes qu'aucune discipline prise séparément ne saurait aborder en intégralité.

Ces études revêtent un caractère multi-échelles, ce qui se traduit par des points de vue allant de l'ouvrage dans son ensemble, l'histoire du château et de ses façades, à l'altération d'une pierre en lien avec son environnement local, et jusqu'à la recherche du rôle du gypse à l'échelle microscopique. Il ne s'agit pas d'un cheminement linéaire qui se limite à zoomer progressivement sur la matière ; chaque point de vue interagit avec les autres.

Le problème doit être traité comme un tout, en essayant de n'oublier aucune discipline, aucune échelle, aucune approche.

4. ORGANISATION DU MANUSCRIT

Les quatre premiers chapitres traitent du carnet de santé, de sa conception, de son renseignement, du traitement des informations le constituant et de son analyse. Les deux derniers chapitres s'attachent à enrichir l'analyse par l'expérimentation en laboratoire : la caractérisation physico-chimique et la réalisation de vieillissements artificiels en conditions contrôlées. Le dernier chapitre présente en perspective l'élargissement possible de ces travaux.

Chapitre 1 : Méthodologie de conception du carnet de santé

Le premier chapitre fixe la méthodologie utilisée pour concevoir le support et récolter les informations constitutives du carnet de santé. À ce titre, il définit comment sont obtenues et représentées les données traitées dans les chapitres 2 à 4. Les parties étudiées du château de Chambord y sont précisées, ainsi que la diversité des sources documentaires utilisées et leur origine. Enfin, les étapes nécessaires pour obtenir un support 2D de représentation des cartographies sont décrites.

Chapitre 2 : Données du passé du monument

L'étude du passé du château de Chambord vise à obtenir une cartographie précisant la date de pose et la nature des matériaux à l'échelle de la pierre, pour les parties étudiées : la tour du Chaudron et la façade sud. Pour obtenir ce résultat, l'histoire de la construction du château, ses aménagements et ses restaurations sont analysés par le biais d'une compilation la plus exhaustive possible des données écrites ou illustrées, produites et conservées au cours des siècles. L'état extrêmement lacunaire et dispersé des sources a nécessité de nombreux recoupements pour consolider les hypothèses et obtenir des cartographies de datation et de nature des pierres raisonnablement justifiées.

Chapitre 3 : Données de l'état actuel du monument

Le troisième chapitre débute par une synthèse des conditions météorologiques subies par les pierres afin de dresser le contexte environnemental dans lequel s'initient et progressent les altérations. Après définition d'un cadre hiérarchique permettant d'organiser les cartographies

d'altérations, ces dernières sont obtenues et tracées selon une méthode similaire à celle utilisée pour illustrer les cartographies de datation et de nature des pierres, mais cette fois-ci en s'appuyant exclusivement sur des observations in-situ de l'état actuel. Enfin, ce chapitre est aussi l'occasion d'analyser la distribution de ces altérations, notamment en corrélation avec les cartographies de nature des pierres issues du chapitre précédent. Complétée par la prise en compte du contexte environnemental, cette analyse croisée visera à fournir des éléments pour identifier les facteurs statistiquement associés à la formation des différents faciès d'altération.

Chapitre 4 : Temporalité et estimation de l'évolution des altérations

La confrontation des différentes cartographies entre elles fournit des éléments clés pour identifier les facteurs statistiquement associés à la formation des différentes altérations. Il reste néanmoins un point majeur qui ne peut pas être abordé par cette approche : la notion de cinétique d'altération. L'étude historique menée précédemment, bien que lacunaire, fournit de précieux repères temporels associés à des représentations de l'ouvrage. Ce chapitre rend compte de l'étude du château dans son ensemble en mettant en vis-à-vis les altérations et l'histoire des pierres. L'objectif de cette analyse est de proposer des perspectives d'évolution de l'état du monument en fournissant les premières pistes quantitatives de cinétiques.

Chapitre 5 : Diagnostic des desquamations en plaques et en feuillets

La desquamation en plaques, altération la plus dommageable des pierres en tuffeau à Chambord, est une altération mal définie, et dont les processus d'altération ne font pas consensus au sein de la communauté scientifique. L'objectif de ce chapitre est de rendre compte de cette complexité, et de l'analyser au regard d'une caractérisation physico-chimique sur des prélèvements réalisés *in situ* dans un souci de représenter différentes étapes d'un même processus. La présence du gypse, sel considéré communément comme potentiellement pathogène, sera quantifiée en termes de teneur, de morphologie et de distribution selon la profondeur, en parallèle d'une autre forme d'altération recensée : la desquamation en feuillets. Une première tentative d'explication des processus de formation de ce gypse sera menée en confrontant les données historiques et environnementales et les résultats de la caractérisation.

Chapitre 6 : Le gypse et le phénomène de desquamation – Simulations expérimentales

Cette partie traite des processus de formation du gypse dans le tuffeau en laboratoire, sous des conditions contrôlées de température, d'humidité, et d'environnement (solution saline, gaz...). L'objectif n'est pas de reproduire la desquamation en plaques à proprement parler, mais plutôt d'élucider la concordance systématique entre fissuration et présence de gypse. Le gypse est-il responsable de la fissuration, est-il une conséquence de la fissuration, ou simplement spectateur ? Répondre à cette question vise à proposer un scénario probable concernant les processus de desquamations et leurs causes.

Chapitre 7 : Perspectives : vers l'établissement d'un carnet de santé numérique

Ce dernier chapitre est consacré aux travaux engagés en vue de l'établissement d'un carnet de santé sous une forme numérique. En effet, le carnet numérique repose sur la création d'un modèle en trois dimensions des parties étudiées, permettant d'enregistrer leur état à une date donnée. Ce modèle permet de servir de support aux données collectées, il a donc été indispensable d'y associer une base de données, afin de stocker ces informations et de les croiser entre elles pour pouvoir les analyser.

CHAPITRE 1

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU CARNET DE SANTÉ

La définition du carnet de santé donnée dans ce travail s'inspire et élargit la notion générale attribuée au carnet de santé de l'Homme. Dans le cadre d'un monument, il inclut l'étude du passé du monument (historique de la construction et des restaurations), la connaissance de son état présent (altération), tout en proposant des *scenarii* d'évolution et donc de remédiation, l'objectif majeur étant la préservation du patrimoine historique, en l'occurrence le patrimoine bâti.

La méthodologie de conception présentée dans ce chapitre est générale, elle peut s'appliquer à n'importe quel monument, mais la description de la démarche s'appuie sur deux parties du château de Chambord : la façade sud et la tour du chaudron.

Les étapes d'établissement de ce carnet de santé et la méthode de regroupement des informations s'articulent autour :

- du récolement de toutes les données nécessaires à l'étude du bâti concernant son passé et son état présent, à travers des sources manuscrites, iconographiques et visuelles.
- de la représentation de ces données en deux dimensions par la réalisation de supports cartographiques.
- de l'analyse et du traitement des données graphiques obtenues.

1. LE CHÂTEAU ET LES FAÇADES ÉTUDIÉES

1.1. LOCALISATION ET DESCRIPTION

À une quinzaine de kilomètres à l'Est de Blois, et au cœur du Blésois et de la Sologne, le château de Chambord, construit par François I^{er} au début du XVI^e siècle, est le plus vaste des châteaux de la Loire¹. Le grand domaine qui l'entoure est un parc de 5525 hectares fermé par 32 kilomètres de murs prévus dès l'origine de la construction du château (Figure 1). À l'intérieur de ce domaine se trouvent également les dépendances du château et les habitations du seul village de France qui appartient entièrement à l'Etat. Le château a été construit le long du Cosson, affluent indirect de la Loire, canalisé aux alentours du château. À partir, du X^e siècle, le site abrite déjà un château fortifié appartenant aux comtes de Blois, entièrement arasé au XVI^e siècle pour permettre la construction du château actuel (Chatenet, 2001 ; Martin-Demézil, 1986 ; Bournon, 1911).

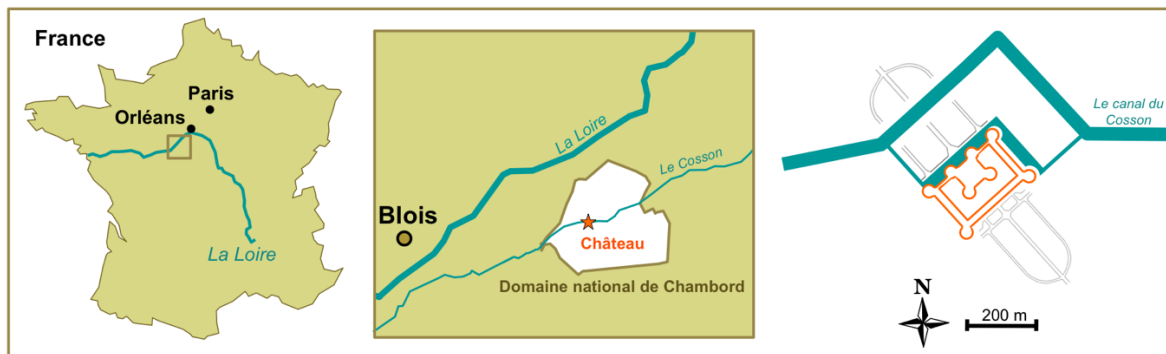


FIGURE 1 : SITUATION DU DOMAINE ET DU CHATEAU DE CHAMBORD

Le projet initial était simplement constitué d'un donjon de plan carré de 44 mètres de côté, cantonné de quatre tours rondes de 20 mètres de diamètre. Dans la continuité de la construction du donjon, une des façades est prolongée de deux ailes latérales qui se rejoignent ensuite pour former une enceinte (large de 135 mètres sur 85 en extérieur), elle aussi cantonnée de quatre tours rondes. Les tours sont orientées selon les quatre points cardinaux. La Figure 2 montre une vue aérienne de l'édifice, où le donjon et les parties au Nord sont élevés sur deux étages, alors que les murs d'enceinte et les deux tours au Sud et à l'Est sont aujourd'hui limités à un seul étage, parfois divisé en entresols. L'enceinte des communs n'est élevée que d'un étage surmonté de terrasses. Jacques Androuet Du Cerceau précise en 1576

¹ Chambord, Département du Loir-et-Cher (41), Région Centre

que les terrasses « ont été ainsi ordonnées pour préserver la vue dudit donjon »². Le donjon est construit autour d'un escalier central à double révolution, unique pour l'époque, qui se termine au sommet par une tour lanterne polygonale. Les toits du donjon et des ailes contiguës sont couverts de cheminées et de lucarnes décorées d'ardoises (Chatenet, 2001 ; Martin-Demézil, 1986).



Cliché : Domaine national de Chambord

FIGURE 2 : VUE AERIENNE DU CHATEAU DE CHAMBORD

1.2. TERMINOLOGIE ET COMPOSITION

Bien que ce soient les tours qui sont orientées selon les quatre points cardinaux, pour des raisons pratiques, certains écrits au sujet du château orientent les murs plutôt que les tours selon ces quatre directions. Le donjon sera donc au Nord au lieu d'être au Nord-Ouest. À l'Est du château passe le Cosson, canalisé dans les douves du château qui longent les murs Nord et Est. Au Sud, se développe une esplanade que l'on appelle la Place d'Arme. À l'Est de la Place d'Arme ont été construites les écuries dites "du Maréchal de Saxe". À l'Ouest du château et de la Place d'Arme se trouvent les habitations principales et l'église du village de Chambord.

Les différents éléments constitutifs du château portent des noms qui ont parfois varié au cours du temps. Nous reprendrons ici la nomenclature communément admise et reportée sur la Figure 3. Au cours de cette étude, nous nous focaliserons sur deux éléments du château, appartenant aux ailes basses des communs :

² Jacques Androuet Du Cerceau, *Les plus excellents bâtiments de France*, 1576

- **L'aile Sud**, aile principale de l'enceinte basse. Elle est constituée de travées rythmées par des pilastres et percées de grandes baies surmontées d'arcs en plein cintre. L'espacement des pilastres est irrégulier alors que le percement des fenêtres tend vers la régularité. L'aile Sud est percée en son centre par le Portail Royal, porche d'entrée actuel du château.
- **La Tour du Chaudron**, tour Est de l'enceinte basse. Cette tour est constituée des mêmes éléments architecturaux que l'aile Sud, mais à l'inverse, la disposition des pilastres est régulière et les travées sont percées de fenêtres de tailles inégales et d'emplacements variables.

Les communs ne sont élevés que sur un étage, ce qui les rend plus aisés à étudier. Parmi les différentes ailes et tours de ces communs, chacune a subi une histoire différente, mais il est possible d'y voir trois ensembles distincts. L'aile des communs d'Orléans a toujours été en ruine et n'a jamais été restaurée, si ce n'est à la fin du XX^e siècle, elle a donc été écartée du choix de façades à étudier. On peut ensuite rapprocher l'aile des Princes de la tour des Princes, puis l'aile Sud de la tour du Chaudron. Plusieurs éléments de l'histoire de leur construction et de l'histoire de leur restauration permettant d'individualiser ces deux ensembles.

Pour le travail présenté ici, l'intérêt de l'aile Sud réside dans le fait qu'elle est l'aile d'entrée du château. Elle a donc très souvent été remaniée et restaurée au cours des siècles, et les dates de pose de pierres et leur nature sont très diverses. A l'inverse, pour la tour du Chaudron, seules cinq de ses travées sont accessibles au public, le reste n'a donc que peu été restauré et présente des altérations beaucoup plus abondantes que les travées de l'aile Sud. De plus, un certain nombre d'opérations de fouilles archéologiques ont été menées dans et aux abords de ces parties du château. Pour un travail méthodologique, c'est l'étude de cet ensemble formé par l'aile Sud et la tour du Chaudron qui semble la plus appropriée, car plus variée.

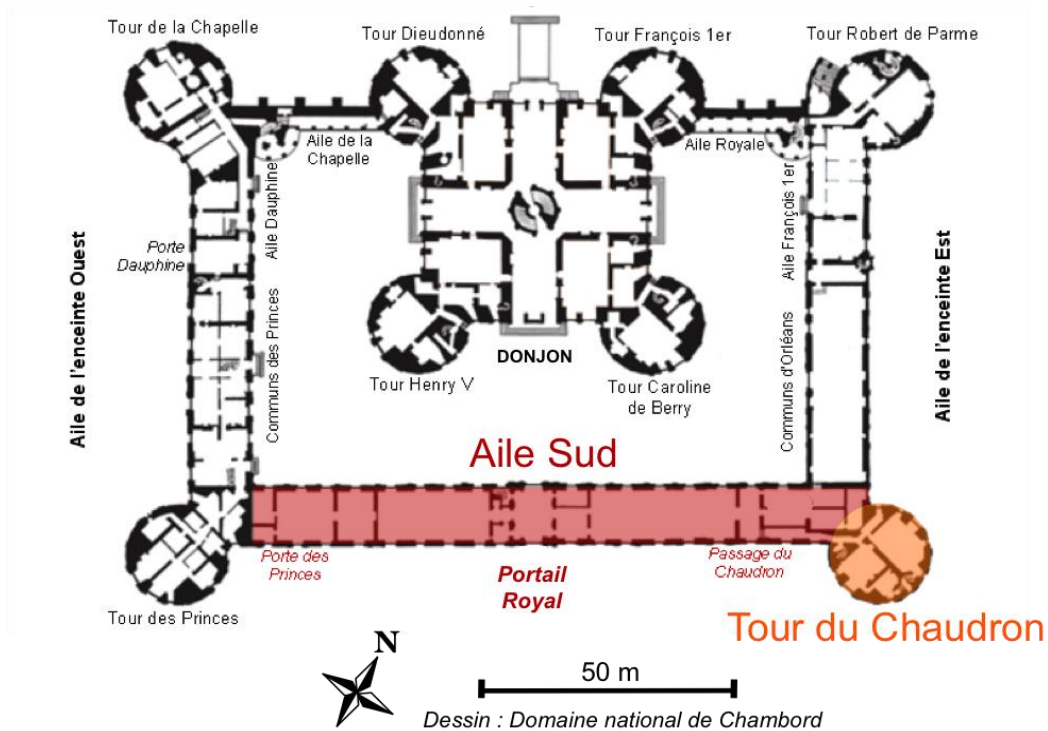


FIGURE 3 : PLAN DU CHATEAU DE CHAMBORD

Un certain nombre de termes architecturaux seront employés dans ce manuscrit. Un lexique illustré regroupe toutes les définitions de ces termes en annexe 1.

2. LE RÉCOLEMENT DES DONNÉES

2.1. SOURCES ÉCRITES

Les sources écrites concernant le château de Chambord sont rares, et l'histoire de sa construction reste mal connue. Lorsque la construction débute en 1519, l'administration centrale des bâtiments du roi n'existait pas encore (elle sera créée un peu plus tard par François 1^{er}), et les documents officiels ne sont pas centralisés. Quelques actes notariés datés du XVI^e siècle sont conservés aux archives nationales et aux archives départementales du Loir-et-Cher, faisant état de l'emploi de maçons ou de commandes de matériaux. Mais la plupart des archives relatives à la construction du château ont disparu. En effet, lors du rattachement de la cour des comptes de Blois à celle de Paris au XVIII^e siècle, il a fallu opérer un tri. Bon nombre de documents ont donc été détruits ou dispersés dans des collections privées (Martin-Demézil, 1986).

Avant cela, ils ont pu être consultés autour de 1680, par Jean Bernier, qui les évoque dans son *Histoire de Blois*, et André Félibien qui en fait un résumé dans ses *Mémoires pour servir à l'histoire des maisons royales*. Mais déjà à cette époque les éléments relatifs à la construction, les projets initiaux, ou le nom exact du ou des architectes, restaient extrêmement lacunaires. Ces travaux ont été repris à partir du milieu du XIX^e siècle par des érudits tels que Louis de la Saussaye, Louis Jarry et Joseph de Croy, dont les écrits ont permis de faire quelque peu avancer les hypothèses sur les débuts de la construction, et d'apporter des informations sur les transformations et travaux à partir du XVII^e siècle, ceux-ci étant mieux connus. Depuis le XIX^e siècle, de nombreux écrits au sujet du château, de son histoire, et du mystère entourant sa construction, ont donc été publiés, bien souvent dans des bulletins de sociétés locales d'histoire ou d'archéologie. Les travaux de Frédéric Lesueur et de Jean Guillaume au milieu du XX^e siècle, se sont entre autres intéressés à la possibilité de plans du château et du grand escalier à double révolution qui auraient pu être réalisés par Léonard de Vinci, ainsi qu'aux changements de plans qui avaient pu s'opérer au XVI^e siècle (Martin-Demézil, 1986). Enfin, plus récemment, deux ouvrages ont été publiés, qui font référence en ce qui concerne l'historiographie et l'histoire du château ; celui de Jean Martin-Demézil de 1986, et celui de Monique Chatenet paru en 2001.

Cependant, outre des textes sur l'histoire ou la description du monument, des rapports relatifs aux travaux d'entretien, de restauration ou de réparation ont été conservés à partir du XIX^e siècle. Ces interventions sont répertoriées en trois catégories : le château, le village et les murs du parc, et séparés selon différents corps de métier : maçonnerie, charpente, couverture, serrurerie, plâtrerie, peinture, plomberie, sculpture, terrassement et fournitures. Ces informations sont minutieusement répertoriées dans des devis de restauration conservés aux archives départementales du Loir-et-Cher³. Ces documents sont d'une aide précieuse pour compléter notre connaissance des remaniements ou restaurations des différentes ailes. Il convient d'ajouter à cela les dossiers de restauration conservés aux archives départementales du Loiret, à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine ou directement à la DRAC⁴ pour les plus récentes, qui sont une source d'informations très précises, de même que les rapports de fouilles effectués lors des travaux d'aménagement de la cour et de l'aile Sud dans les quinze dernières années. Bon nombre de ces documents archivés sont complétés par des

³ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), et notamment le fonds 37 Q Travaux (inventaire du contenu réalisé par Corine Langlois il y a quelques années)

⁴ Archives Départementales du Loiret, Orléans (45), fonds contemporain
Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Charenton-le-Pont (94)
Direction Régionale des Affaires culturelles (DRAC) de la Région Centre, Orléans (45)

échanges de lettres entre conservateurs, intendants ou architectes en chef, dans lesquelles les entreprises de restauration sont très souvent fustigées.

L'ensemble des références de ces sources écrites répertoriées dans le cadre de ce travail concernant l'aile Sud et la tour du Chaudron peut être consulté à l'annexe 2.1.

2.2. SOURCES ICONOGRAPHIQUES

Les gravures constituent les données iconographiques les plus anciennes que l'on puisse consulter. Des plans du château et du domaine ont été réalisés et conservés dès le XVI^e siècle, citons par exemple ceux de Jacques Androuet du Cerceau, Jean Chéreau, André Félibien, ou encore Eugène Viollet-le-Duc. Ces plans permettent d'obtenir des informations sur la répartition des ouvertures, l'épaisseur des murs, la répartition des pièces. A ces plans s'ajoutent des vues des élévations du château, orientées tantôt face à l'aile Sud, tantôt face à la façade Nord du Donjon. Ils vont de vues représentant des projets non réalisés (du Cerceau), à des perspectives et représentations fantasques (Antoine Aveline), en passant par des relevés architecturaux jugés plus réalistes et fidèles comme ceux d'Israël Sylvestre et de Georges Louis Le Rouge. Enfin, de nombreuses autres gravures, parfois anonymes sont conservées aux archives nationales. Les deux façades les plus souvent représentées sont la vue depuis le Sud, et celle depuis le Nord, ce qui a l'avantage, souvent, de permettre de bien visualiser l'aile Sud et le Portail Royal. En revanche, la tour du chaudron souffre d'un défaut de représentations sur l'ensemble de ses travées, à l'exception de celles orientées au Sud. Les plans sont généralement jugés plus fiables et surtout plus complets que les dessins d'élévations, puisqu'ils fournissent des informations sur toutes les orientations des façades et pas uniquement celle concernée par la vue. Cependant, l'ensemble de ces gravures révèle une plus ou moins grande part d'interprétation qu'il conviendra de garder à l'esprit au cours de cette étude.

Les rapports d'entretien, de restauration ou de réparation cités plus haut, qu'il s'agisse de ceux du XIX^e siècle ou de ceux du XX^e siècle, sont très souvent complétés par des plans et dessins d'élévations. Ce ne sont plus des vues d'ensemble, comme les gravures précédentes, mais des dessins techniques de parties précises, concernées par les restaurations. La justesse scientifique de ces plans et dessins est beaucoup moins mise en doute. Au XIX^e siècle, ce sont les planches de Jules Desbois, responsable des travaux de restauration du donjon notamment, qui apportent de nouvelles informations.

L'étude des gravures et dessins techniques peut être complétée par celle des photographies, datées pour les plus anciennes de la fin du XIX^e siècle, archivées à la photothèque de la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, ou encore transformées à l'époque en cartes postales, et qui sont pour beaucoup conservées aux archives départementales du Loir-et-Cher (voir annexe 2.2). Les photographies permettent d'observer clairement les modifications structurelles du bâti en limitant les inquiétudes d'interprétation ou de déformation de la réalité. Si ce sont souvent des vues d'ensemble qui ont été prises, les parties sculptées ont parfois été photographiées (chapiteaux, pilastres, corniches), donnant des indices importants sur des remplacements de pierres effectués ou de progression d'une altération. Des photographies plus récentes ont également pu être récolées, provenant d'études scientifiques (Beck, 2006 ; Thomachot, 1998) ou stylistiques (Moucheboeuf, 1994). Ce sont également de précieux témoins qu'il convient d'étudier et qui illustreront les chapitres à venir.

La comparaison de toutes ces vues avec les façades actuelles permet de visualiser les transformations qu'elles ont pu subir (remaniements ou dégradation), et complètent souvent très avantageusement les sources écrites parfois succinctes ou lacunaires.

2.3. OBSERVATIONS DE TERRAIN

Enfin, il y a des informations qui ne peuvent être révélées ou confirmées que par l'étude du bâti et les observations directement faites sur le monument.

Outre l'observation des différentes altérations qui se développent sur les parements, et leur relevé précis, observer les façades apporte un certain nombre d'informations d'ordre archéologique et historique, sur les techniques de construction en général ou sur les étapes chronologiques de construction de l'aile Sud et de la tour du Chaudron en particulier. Ces informations revêtent parfois l'aspect d'indices révélateurs de modifications des choix architecturaux. On observe par exemple des traces trahissant l'agrandissement ou de nouveaux percements de baies, comme sur la Figure 4(A) où les moulures des baies, agrandies par la suite, laissent cette moulure interrompue. On peut remarquer également des implantations d'assises de pierres ou des formes sculptées très différentes d'une zone à l'autre de la façade, comme par exemple sur ces pilastres en Figure 4(B). Enfin, des portes murées sont observées sur la façade Sud, trahies parfois uniquement par leur linteau visible en Figure 4(C).

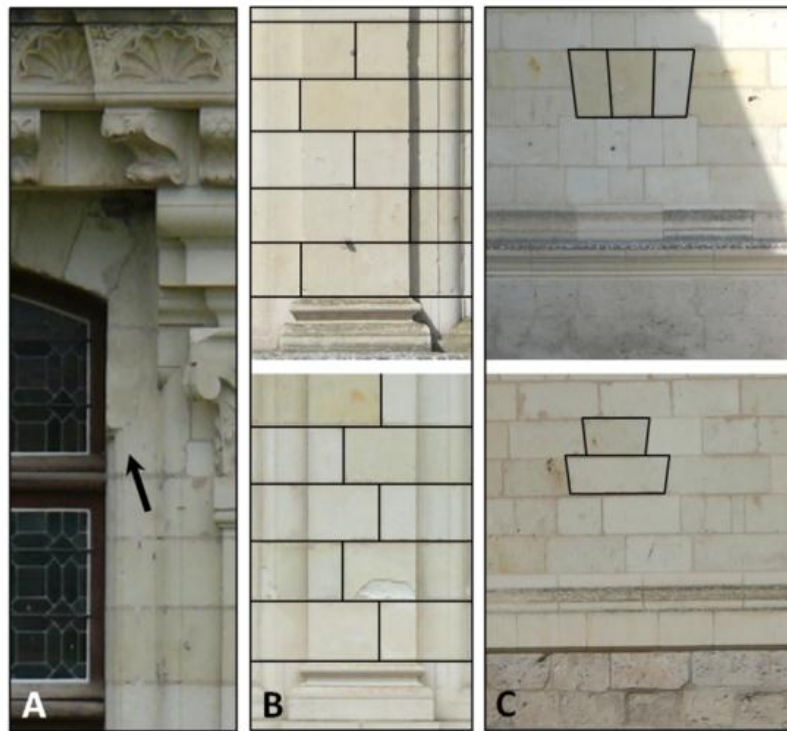


FIGURE 4 : EXEMPLES DE MODIFICATIONS DE CHOIX ARCHITECTURAUX - AILE SUD.
AGRANDISSEMENT DES BAIES (A). DIFFERENCES D'IMPLANTATION DES ASSISES (B) ET PORTE MUREE (C)

D'autres traces archéologiques peuvent être relevées sur ces façades. Des trous censés accueillir les boulins nécessaires à l'échafaudage de la façade pour sa construction sont encore visibles, souvent bouchés. L'étude de leur répartition sur la façade permet d'apporter aux historiens de la construction des informations sur les chantiers renaissants. De la même manière, on peut relever un certain nombre de marques gravées en surface des parements. Certains sont des graffitis et ne nous intéressent pas dans cette étude. D'autres sont des marques utilitaires comme les signes lapidaires, et leur relevé permet d'identifier une partie des pierres comme étant "d'origine", car ces marques, dans la tradition du Moyen Age, ne concernent que le chantier de construction daté du XVI^e siècle. Les restaurations postérieures ne présentent aucun signe lapidaire. Il existe des signes lapidaires qui sont des marqueurs destinés à la position ou l'assemblage de pierres, et d'autres qui sont des marques identitaires (Esquieu et Hartmann-Virnich, 2007). Il semblerait que les marques observées sur l'aile Sud et la tour du Chaudron appartiennent à cette deuxième catégorie (Hofbauer, 2004 ; Hofbauer, 2002). En l'absence de textes relatifs à ces marques, il n'est pas toujours aisé d'en définir clairement l'origine. Dans le cadre de Chambord, l'hypothèse communément admise est que chaque tailleur de pierre sur le chantier avait son signe distinctif, qu'il gravait dans les parements qu'il avait sculptés. Pour les parements lisses, les tailleurs de pierre étaient payés à la toise ou à la journée. Pour les parties sculptées (telles que les corniches, pilastres, moulures),

ils étaient payés à la tâche, soit au nombre de sculptures réalisées⁵ (Prigent et Sapin, 2004 ; Chatenet, 2001). C'est pourquoi on retrouve ces signes notamment au niveau des pilastres et chapiteaux, et des moulures des jambages des baies. Ils sont également présents sur les pierres de l'entablement qui ont été conservées et sur les parties non remplacées du stylobate. Grandes de cinq centimètres en moyenne, ces marques (lettres ou signes géométriques) sont aisément sculptées en traits et courbes dans la texture tendre du tuffeau, comme l'illustre la Figure 5. Quel que soit leur rôle réel, ces signes lapidaires sont, dans le cadre de cette étude, un outil de datation important.

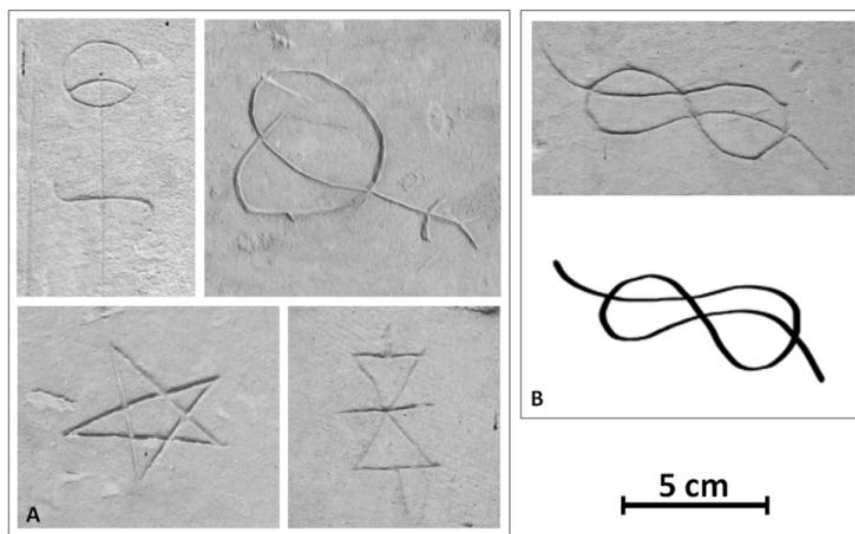


FIGURE 5 : EXEMPLES DE SIGNES LAPIDAIRES DE L'AILE SUD (A) ET REPRÉSENTATION GRAPHIQUE D'UN SIGNE (B)

Ces observations de terrain permettent également de lever le doute sur des restaurations dont on trouve des traces dans les archives. En effet, si une zone a été restaurée, il est probable que dès le XIX^e siècle, les devis et mémoires sont relativement complets, faisant figurer la localisation globale des restaurations, la quantité de pierres à commander et à tailler, leur nature, etc. En revanche, l'adjonction de plans et dessins précisant la localisation de l'assise et de la pierre remplacée n'est pas systématique. Seule l'observation du faciès de la pierre peut aider dans l'identification des pierres remplacées. Par exemple, il est difficile de distinguer deux pierres datant l'une du XVI^e siècle, l'autre du XVII^e siècle, car leur usure en surface, ou leur état d'altération peut être semblable. En revanche, on peut différencier une pierre « ancienne » d'une pierre contemporaine lorsque cela concerne des opérations récentes de remplacement de pierre, car la taille mécanique de la surface de la pierre remplacée se

⁵ Dès 1519, François Pontbriand, surintendant des travaux, est chargé de « Bailler la besogne, à la toise ou à la tâche, ou de toute autre manières vous cognoitriez nécessaire » (Hofbauer, 2002).

distingue de la surface légèrement érodée et patinée d'une pierre ancienne (Figure 6). Si les deux pierres sont de natures différentes, cette différenciation en est facilitée. De plus, lors d'une opération de remplacement de pierre, les mortiers de rejointoiement sont refaits, et leur différence de composition est visible à l'œil nu (couleur de la pâte, taille et couleur des granulats, ...), permettant de mettre en évidence les restaurations effectuées comme le montre la Figure 6. Cependant, si cette différenciation est possible pour les calcaires utilisés en élévation, plus fins, elle est beaucoup plus difficile pour les pierres des soubassements, plus grossières.



FIGURE 6 : EXEMPLE DE DIFFERENCE DE FACIES ENTRE PIERRES D'ORIGINE, PIERRES REMPLACEES ET PIERRES DES SOUBASSEMENTS, ET EXEMPLE DE JUXTAPOSITION DE MORTIERS DE REJOINTOIEMENT DIFFERENTS - AILE SUD

Ces observations de terrain peuvent être complétées par des diagnostics *in situ* non destructifs des façades. En effet, la thermographie infrarouge permet de mettre en évidence des différences de diffusion thermique entre les matériaux observés, révélant des propriétés thermiques différentes entre ces matériaux juxtaposés (Figure 7). Ainsi, dans notre cas, après une nuit froide, lorsque la façade subit l'action du soleil, le tuffeau se réchauffe plus rapidement que d'autres pierres calcaires comme la pierre de Richemont, entraînant des différences de température en surface, visibles sur l'image thermique. Cette technique de diagnostic facilite, et permet de confirmer en cas de doute, l'identification des différentes natures de pierres.

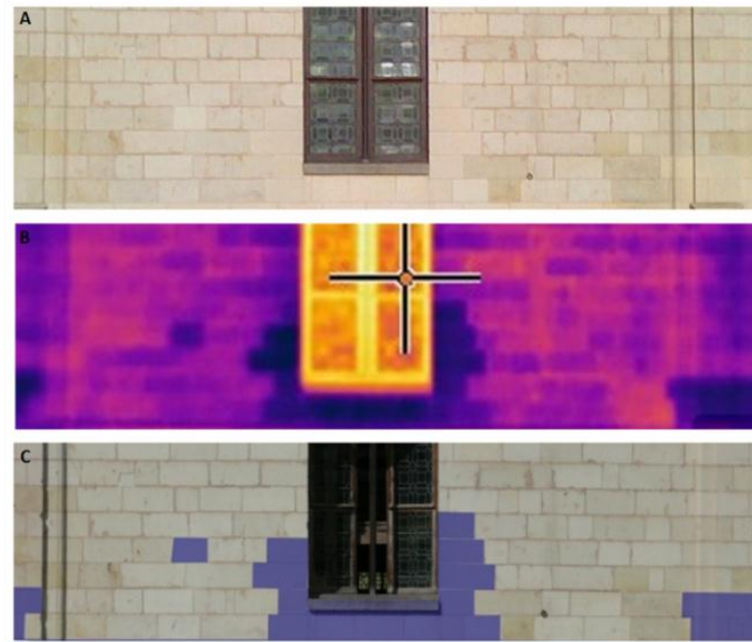


FIGURE 7 : EXEMPLE D'UNE TRAVEE DE L'AILE SUD (A), VUE DES DIFFERENTES NATURES DE PIERRES EN IMAGERIE THERMIQUE (B) ET CARTOGRAPHIE DES PIERRES DE RICHEMONT REMPLACEES (C)

2.4. REMARQUES ET AVERTISSEMENTS

Les données collectées doivent être traitées et utilisées avec précaution en raison de leurs différents niveaux de fiabilité. Plusieurs remarques peuvent être formulées quant à l'utilisation de ces données.

Le type d'informations conservées n'est pas comparable d'une époque à l'autre. Ainsi, entre les devis et mémoires du XIX^e siècle et ceux du XX^e siècle, le niveau de détail est différent et la conservation de ces documents au XX^e siècle est plus systématique. De même, si les correspondances des architectes étaient conservées au XX^e siècle, la correspondance électronique contemporaine ne conduit pas à une sauvegarde de ces courriers par les institutions. Le statut même des architectes en chef des monuments historiques, à la fois fonctionnaires et de profession libérale de droit privé, les oblige à adresser une copie de tout dossier (dossier documentaire ou dossier des ouvrages exécutés) au service départemental de l'architecture et du patrimoine⁶. Même si les convictions et les pratiques de la discipline vont dans le sens d'une conservation de ces documents, on constate tout de même des lacunes de certaines données.

⁶ Circulaire relative à la maîtrise d'œuvre des travaux sur les monuments historiques classés ou inscrits, Ministère de la Culture et de la Communication, 1^{er} Décembre 2009

L'ensemble des sources n'est pas toujours suffisamment complet pour pouvoir systématiquement affirmer de manière certaine la date d'un remplacement. En effet, les documents conservés et étudiés ici sont souvent des devis de restauration, et peuvent très bien constituer des projets qui n'ont peut-être jamais été réalisés. Pour être certain de la réalisation des travaux mentionnés dans un devis, il faut consulter le mémoire des travaux qui lui est associé. Il est des cas où ces deux documents ne sont pas conservés dans un même lieu, d'autres cas où seul le devis a été conservé mais où les observations de terrain confirment la réalisation des travaux, et enfin, des cas où le doute subsiste. Il convient donc de garder un regard critique sur les documents exploités et surtout de rester transparent quant aux incertitudes de datations.

Dans ces documents, il est très souvent fait mention du donjon ainsi que des ailes et tours élevées sur plusieurs niveaux, mais très peu des constructions de l'enceinte basse qui nous intéresse, certainement parce que ce sont les moins prestigieuses, mais également car ce sont les plus simples architecturalement. En effet, les cheminées, les terrasses ou les toitures du donjon, très nombreuses, ont souvent dû être réparées, restaurées, reconstruites, du fait de leur grande fragilité et de leur exposition aux intempéries. Les ailes basses et les tours au sud sont plus massives, et moins exposées à ces types de dégradations. Les informations sur l'enceinte basse sont donc lacunaires, et souvent noyées dans les données relatives au donjon.

De même, les gravures de plans et d'élévations sont à prendre avec beaucoup de précautions, car ces documents sont empreints de subjectivité. Ils peuvent être une représentation fidèle de la réalité, comme des projets non réalisés, sans que l'on puisse en avoir la certitude. Prenons l'exemple de Du Cerceau, que l'on accusait souvent de libre interprétation dans ses gravures lorsqu'il faisait figurer de fausses braies devant l'aile Sud et l'aile des Princes, alors que les fouilles archéologiques récentes effectuées en 2010-2011 par l'INRAP (sous la direction de S. Bryant) lui ont donné raison.

Il faut également noter le fait que les travaux de restauration ne sont pas forcément synonymes de pose de pierres neuves. De vieilles pierres en relativement bon état pouvaient être déposées, retaillées et reposées à un autre endroit. On sait aussi que les pierres altérées n'étaient pas systématiquement remplacées, mais parfois simplement ravalées sur une épaisseur de quelques millimètres, jusqu'à la pierre saine⁷. Dans ces deux cas, les pierres remployées sont toujours retaillées jusqu'à obtenir une pierre « neuve » et non altérée, et dans notre étude, nous considérerons cette date de restaurations comme la date de pose de la

⁷ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, 1937, travaux de l'aile Sud

Pierre, même si ces cas sont rares pour les parties étudiées. Les observations visuelles sont donc également des informations à intégrer avec précaution au raisonnement.

Enfin, l'observation des différents indices de surface peut être limitée par l'étalement des altérations en surface de la pierre. En effet, les altérations biologiques, comme les lichens, peuvent masquer les marques archéologiques (faciès de pierres, mortiers, signes lapidaires), et peuvent perturber l'imagerie thermique par la création d'artefacts (zones qui apparaissent plus chaudes, ce qui est dû à l'activité biologique et non à la nature de la pierre sous-jacente).

Ces données d'observation ne suffisent pas à elles seules. Elles doivent être croisées entre elles et corrélées aux données issues des sources manuscrites et iconographiques, afin de produire des documents les plus justes et objectifs possibles, illustrés sous forme de cartographies.

3. LA DÉMARCHE ILLUSTRATIVE

3.1. CONSTRUCTION DU SUPPORT

La base d'une étude architecturale repose sur la représentation des données acquises en vue d'une réflexion critique et analytique (Nunez Andrés et Buill Pozuelo, 2009). La question s'est donc immédiatement posée de la représentation des données collectées, et donc de la création d'un support graphique. Ce support doit répondre à différentes exigences :

- Une rapidité et une facilité de réalisation
- Une précision quasi photographique
- Une haute qualité d'image permettant une visualisation correcte du plus petit module exigé : la pierre

La façade de l'aile Sud, bien qu'animée d'éléments sculptés, est simple et répétitive par sa succession de pilastres et de travées percées ou non de baies, comprises entre un soubassement en partie basse et des balustrades s'élevant à 8 mètres environ. La seule difficulté réside dans le plan cylindrique de la tour du Chaudron, bien qu'elle ne soit architecturalement constituée que d'une succession de pilastres et travées, à l'instar de l'aile Sud. Dans cette étude, seuls seront concernés les parements de maçonnerie extérieurs de ces deux façades, et uniquement la partie donnant sur la place d'arme pour l'aile Sud.

Historiquement, l'architecture s'illustre par trois formes graphiques : le plan, la coupe, l'élévation. Avec les outils de mesures et les outils informatiques actuels, et notamment la photogrammétrie et la stéréophotogrammétrie, leur réalisation en est facilitée et la précision améliorée. Mieux qu'un relevé manuel, imprécis, et mieux qu'une photographie, déformée, le relevé architectural obtenu est généralement un dessin, très précis et à l'échelle, des façades et de leurs reliefs (pilastres, chapiteaux, corniches, baies, ...). L'Inventaire Général, institué en 1964 par André Malraux, a très rapidement introduit ces techniques dans le travail d'archivage des monuments historiques (Babelon et Chastel, 1994). Le relevé photogrammétrique du château de Chambord a été réalisé en 1977⁸, mais ce type de support ne pouvait correspondre aux exigences de ce travail : si le relevé des éléments structurels et décoratifs est juste et précis, aucune pierre, ni aucun joint de mortier ne figure sur ce relevé. Or, ce sont les informations qui nous intéressent en priorité. Le dessin pierre à pierre d'une façade, comme il peut être fait en archéologie, n'est pas impossible, mais il est fastidieux et ne répond pas aux exigences de rapidité d'exécution de ce travail. C'est donc la photographie qui a été privilégiée.

Le modèle de représentation le plus courant d'une façade est l'orthophotographie, ou orthoimage. D'abord utilisée en géographie pour la réalisation de cartes par traitement de photographies aériennes, cette technique s'applique tout aussi bien à des façades, le sujet n'étant plus un plan au sol mais un objet architectural. L'orthoimage est une image dont toutes les déformations dues à la prise de vue (perspective) ou aux défauts optiques de l'appareil en lui-même ont été corrigées, de manière à ce que chaque point de l'image soit orthogonal à la prise de vue. La distance entre deux points doit, en tout endroit de l'image, garder le même rapport que dans la réalité (Baltsavias, 1996). Ce terme générique d'orthophotographie regroupe en fait une variété de techniques automatiques ou manuelles dont le rendu final approche plus ou moins la justesse scientifique.

Actuellement, la méthode la plus couramment utilisée dans le domaine de la vision assistée par ordinateur est obtenue par projection en 2D d'une vue d'un modèle 3D. Ce modèle 3D peut être généré par photomodélisation en utilisant des logiciels comme ImageModeler, plus utilisé en architecture. Le résultat en 3D est un ensemble de volumes formant l'architecture, sur les surfaces desquelles sont appliquées des textures, les images étant recalées entre elles dans l'espace par un procédé de triangulation spatiale de points homologues sélectionnés manuellement, puis un relevé topographique est utilisé pour leur donner une échelle et un repère spatial (Lo Buglio et Derycke, 2009).

⁸ Les relevés photogrammétriques d'architecture de l'Inventaire général – Château de Chambord, 15 juin-15 septembre 1977

Les modèles 3D peuvent aussi être générés par corrélation dense d'images, comme dans le cas de l'utilisation de MicMac, développé initialement par l'IGN dans le but de réaliser des modèles 3D de reliefs terrestres naturels à partir de photos aériennes. L'orthoimage obtenue est une projection orthographique du modèle 3D selon un angle de vue choisi. Le modèle 3D est un nuage de points dont la densité sera proportionnelle à la qualité de l'image finale (Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2011). Les méthodes automatisées utilisant la corrélation dense d'images nécessitent une calibration de l'appareil photo (focale, centre optique, paramètres de distorsion) et une orientation relatives des prises de vue par triangulation spatiale de points homologues détectés automatiquement (Algorithme SIFT). Elles nécessitent aussi l'utilisation de logiciels spécifiques, et un traitement lourd de génération d'un modèle 3D, alors qu'à ce stade de l'étude, seule l'obtention rapide d'une image 2D nous importe.

Dans un premier temps, du fait que notre objectif se limite à disposer d'un support 2D globalement représentatif de l'élévation, permettant de distinguer les pierres, c'est donc la technique d'assemblage manuel de photographies grâce à des logiciels classiques de traitement d'images⁹ qui a été choisie en raison de sa simplicité et de sa rapidité technique, afin de construire la frise qui servira de support à la représentation graphique des données collectées. Les photographies prises destinées à être assemblées devaient répondre à un certain nombre de critères :

- Pour limiter les déformations liées à la perspective, les photographies ont été prises à un peu plus d'une dizaine de mètres de la façade, en respectant cette distance pour toutes les travées (Figure 8). Pour obtenir une frise en haute résolution, une bonne définition d'appareil photo est nécessaire¹⁰.

- Pour limiter les déformations liées au système optique de l'appareil photo, seule la partie centrale des photographies a été utilisée, ce qui nécessite un fort recouvrement des photos entre elles (Figure 8-B).

⁹ Ici, le logiciel utilisé est **GIMP**, (*GNU Image Manipulation Program*), logiciel libre et gratuit de traitement d'images

¹⁰ Appareil photo Canon EOS 500D, 15 méga pixels - Objectif 18-55 mm

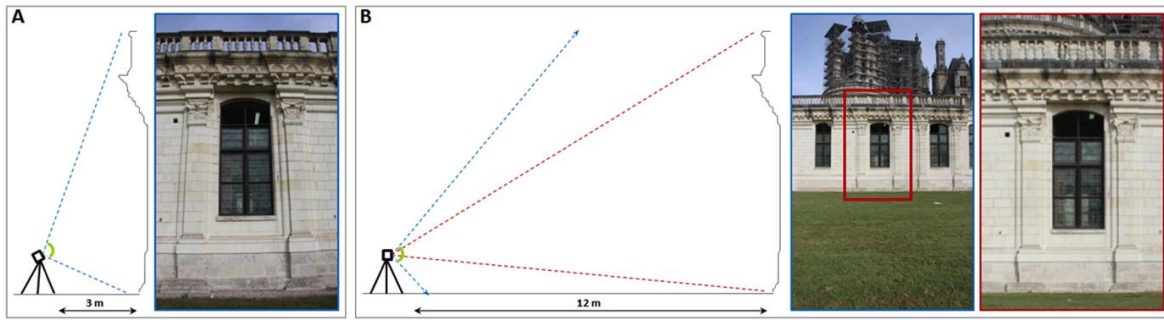


FIGURE 8 : EXEMPLE DE DEFORMATION LIEE A LA PERSPECTIVE LORSQUE LA PHOTOGRAPHIE EST PRISE DE PRES (A) ET EXEMPLE DE LIMITATION DE LA DEFORMATION LORSQUE LA PHOTOGRAPHIE EST PRISE A UNE PLUS GRANDE DISTANCE DE LA FAÇADE (B)

- Pour limiter l'impact des conditions environnementales, les photographies ont été prises dans les mêmes conditions d'éclairage, sans qu'aucun réglage ou paramètre n'ait été modifié au cours des prises de vue. Les photographies prises par temps couvert permettent d'obtenir une luminosité homogène d'un cliché à l'autre, mais cet avantage est contrebalancé par un rendu trop sombre des photographies. C'est donc par beau temps que les photographies ont été prises, avec l'inconvénient que la tour du Chaudron, orientée selon trois des points cardinaux, présente des textures peu homogènes d'un bout à l'autre de la frise, les ombres et lumières accentuant parfois la forme circulaire de la tour.

- La présence d'obstacles (personnes, véhicules, panneaux, autres bâtiments ne permettant pas le recul nécessaire) a pu souvent être évitée en raison du caractère dégagé et isolé des façades (à l'inverse d'un bâtiment inséré dans un tissu urbain). La tour du Chaudron a cependant généré plus de contraintes que l'aile Sud, dans le cas notamment du contournement des doutes, et de la présence de murets et barrières occultant certains parements.

- Le traitement informatique postérieur a consisté à corriger l'inclinaison des prises de vue lorsque l'horizontalité n'était pas respectée, à remettre à la même échelle les clichés, à les découper pour ne conserver que la partie centrale, pour enfin réaliser l'assemblage des images conduisant à la création de la frise. Aucune égalisation radiométrique (modification de la couleur, du contraste et de la luminosité) n'a été faite. De même, les déformations optiques dues à l'appareil n'ont pas été corrigées par informatique, mais simplement minimisées par la seule utilisation de la partie centrale des photos.

Des précisions et améliorations méthodologiques seront proposées à ce modèle et à la représentation des données dans le dernier chapitre de cette thèse.

3.2. REPRESENTATION DES DONNEES

A l'instar de la réalisation d'une carte géographique terrestre, les façades deviennent le support vertical de cartographies architecturales. Ces frises photographiques réalisées servent de support graphique permettant d'illustrer les données collectées ensuite.

Seules les maçonneries, des soubassements aux rampantes, nous intéressent dans cette étude. Les menuiseries ont donc été extraites de la frise obtenue, et le contour de la façade entièrement détourné. Pour une meilleure lisibilité, les frises ont été découpées en deux parties pour la tour du Chaudron, et en trois parties pour l'aile Sud ; aux extrémités gauche et droite figurent les noms des ailes ou tours attenantes. Cette représentation sera adoptée pour les cartographies présentes dans ce manuscrit, notamment aux chapitres 2 et 3 (Figure 9).

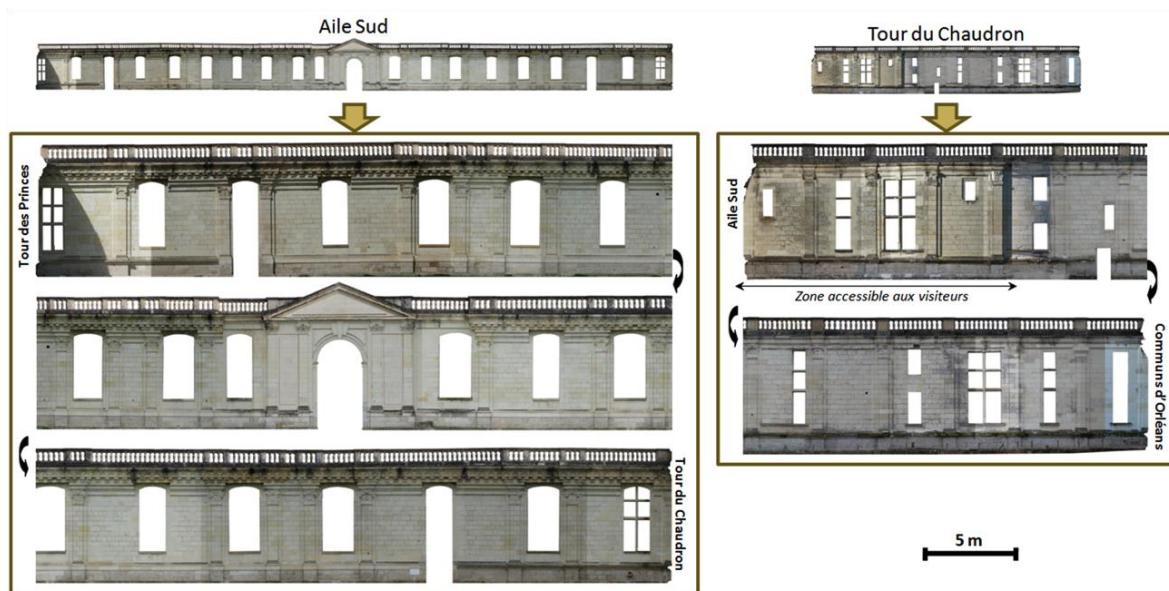


FIGURE 9 : ASSEMBLAGE ET FRISE FINALE DE LA FAÇADE EXTERIEURE DE L'AILE SUD ET DE LA TOUR DU CHAUDRON

Généralement, lors de la réalisation de cartographies de façades, celles-ci sont redessinées pierre à pierre, et c'est sur ce support de dessin que sont apposées les informations cartographiées. Dans notre cas, la façade est suffisamment lisible pour que la cartographie soit réalisée directement sur le support photographique. De plus, ce choix permet de conserver un maximum d'éléments qui facilitent ensuite le travail de cartographie (variations chromatiques d'une pierre à l'autre, altérations visibles, détails de sculptures, joints de mortiers, signes lapidaires, ...).

C'est directement sur le terrain que les premiers **relevés** sont effectués, sur papier :

- Le relevé des différentes formes d'altérations par tracé de leur contour.
- Le relevé des différentes traces à la surface de la pierre (signes lapidaires, pierres présentant un faciès « neuf » ou récent), permettant de faire une première approximation des pierres remplacées ou d'origine.
- Le relevé des différentes textures et couleurs de mortiers. Ils permettent parfois de différencier deux restaurations effectuées à deux dates différentes, pour lesquelles des pierres « récemment » posées sont présentes dans les deux cas, mais où deux mortiers différents auraient été employés. Il faut toutefois utiliser cette information avec précaution : les pierres sont parfois rejointoyées en surface sans qu'il y ait nécessairement un remplacement de pierre.

Ces relevés sont ensuite confrontés aux données issues de l'étude des archives et des documents iconographiques, pour produire des **cartographies** informatiques. Les différentes informations que l'on souhaite cartographier sur les façades doivent être dessinées, en utilisant un logiciel de dessin vectoriel¹¹ qui permet le dessin de toutes les formes souhaitées, gérées par un système de tri et d'empilement de calques. Le tracé des formes est réalisé point à point, par des courbes de Bézier, permettant une modification du tracé au niveau des points de contrôle.

La réalisation de cartographies est une démarche courante pour bien des professionnels de la conservation du patrimoine, et c'est ce qui a été adoptée dans cette étude. Le type de cartographies varie en fonction des disciplines et de la finalité du travail (Figure 10). Toutes sont utiles dans la préparation d'un projet de restauration¹² :

- Les archéologues du bâti procèdent systématiquement à des cartographies pierre à pierre des façades ou vestiges étudiés, sur lesquelles ils font figurer, par le biais d'unités stratigraphiques, la datation des différentes phases de construction, ou bien des traces archéologiques comme les signes lapidaires, ... (Reveyron, 2002 ; Bryant *et al.*, 2007). Confronter les textes, les sources iconographiques et les observations visuelles est également une pratique des architectes du patrimoine ou des architectes en chef des monuments historiques, ces critiques d'authenticité figurant dans leurs dossiers documentaires ou leurs

¹¹ Le logiciel utilisé ici est **Inkscape**, logiciel de dessin vectoriel libre et gratuit

¹² Exemple de la restauration de la collégiale de Neuchâtel, 2009 : <http://www.restaurationcollégialeneuchatel.ch/>

dossiers des ouvrages exécutés. Il existe d'ailleurs plusieurs niveaux de représentation des données historiques (en 2D ou en 3D) permettant d'analyser et d'évaluer les différentes phases de constructions ou de restaurations, à différentes échelles et différents niveaux de précision. Ces systèmes de représentations peuvent par exemple s'appliquer à toute une ville (Stefani *et al.*, 2009) ou à un quartier (Saygi et Hamamcioğlu-Turan, 2009), pour lesquels le module le plus petit est à l'échelle du bâtiment, ou encore simplement à une façade (Akbaylar et Hamamcioğlu-Turan, 2007), comme dans notre cas, où le module le plus petit est à l'échelle de la pierre.

- La cartographie pierre à pierre avec indication des natures et provenances de chaque pierre est en revanche plus souvent pratiquée par les géologues travaillant dans le domaine de la conservation des monuments historiques, après observation du faciès des pierres, consultation des documents d'archives et parfois prélèvements pour analyses pétrographiques (Montel, 2007 ; Rautureau, 2001).

- Enfin, le relevé et la représentation graphique des différentes formes d'altérations sont généralement effectués par les scientifiques de la conservation dans le cadre de diagnostics d'altération d'ouvrages du patrimoine (Janvier-Badosa *et al.*, 2012 ; Akbaylar et Hamamcioğlu-Turan, 2007 ; Fitzner *et al.*, 2002). Des logiciels ont d'ailleurs été créés et commercialisés pour faciliter ce travail de relevé et de représentation des données¹³.

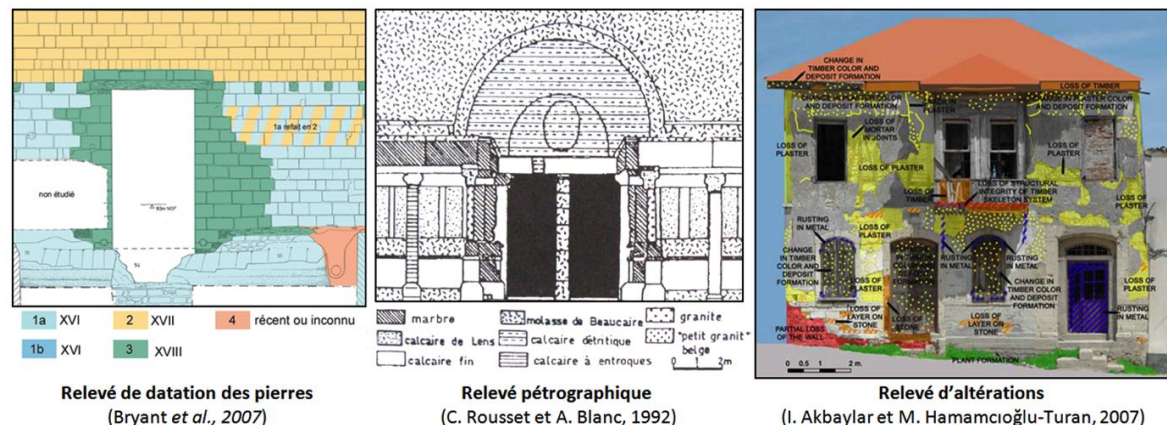


FIGURE 10 : EXEMPLES DE CARTOGRAPHIES PIERRE A PIERRE REALISEES DANS DIFFERENTES DISCIPLINES

¹³ Exemple du logiciel allemand **Metigo Map**, largement utilisé par les acteurs de la conservation de patrimoine, en Allemagne : http://www.fokus-gmbh-leipzig.de/metigo_map-Kartierung.php?lang=fr

3.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Une fois les cartographies créées sur un support informatique, l'intérêt est d'analyser les données représentées en 2D sur les façades. Les cartographies peuvent être analysées individuellement, ou encore croisées entre elles afin de faire ressortir de nouvelles informations.

Pour cela, il est préférable d'utiliser un système de calques. A chaque calque correspond une information, c'est-à-dire une forme dessinée. Pour les datations par exemple, à chaque calque correspond une date de pose de pierre. Toutes les pierres de cette date sont donc dessinées et appartiennent à ce calque auquel correspond un code couleur qui lui est propre. La transparence de la forme dessinée permet une meilleure lisibilité de la photographie sous-jacente. Lorsqu'une pierre isolée est concernée par une date, seul un rectangle est dessiné, lorsque c'est un ensemble de pierres juxtaposées, la forme englobe l'ensemble des pierres (Figure 11). Pour les altérations, le dessin ne suit plus la forme des pierres, mais le contour de l'altération.

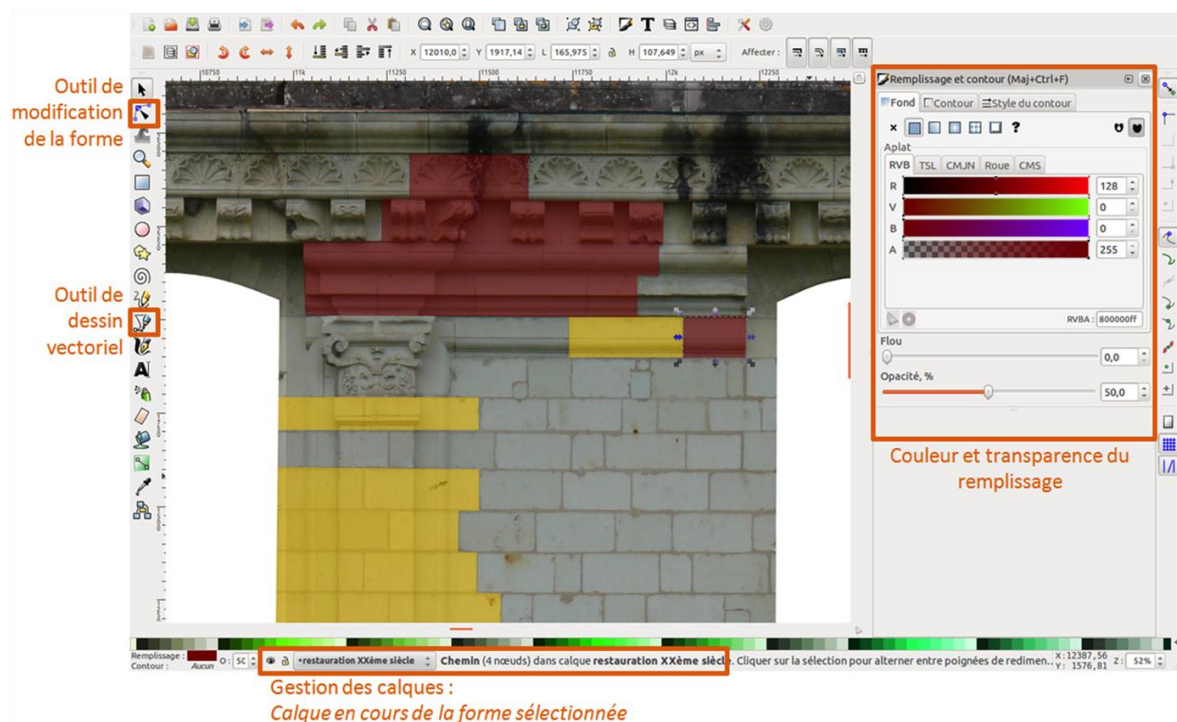


FIGURE 11 : ILLUSTRATION DE L'INTERFACE DE DESSIN VECTORIEL UTILISEE, DETAIL DE L'AILE SUD

Que les cartographies soient étudiées individuellement ou bien croisées entre elles pour mettre en évidence les informations recherchées, il est possible d'analyser les données de deux manières :

- En observant la répartition spatiale des éléments cartographiés. La façade doit être disposée dans un repère orthonormé permettant une localisation des informations par le biais de coordonnées spatiales, comme dans le cas d'un Système d'Information Géographique (SIG). Ce travail n'a pas été spécifiquement fait dans cette étude, mais il pourrait s'avérer très intéressant dans une démarche archéologique, notamment au niveau de la répartition spatiale des différents signes lapidaires ou des trous de boulins.

- En réalisant des calculs statistiques des aires des éléments cartographiés. A chaque aplat de couleur correspond un nombre de pixels qu'il est possible de comptabiliser (par l'intermédiaire du logiciel Gimp par exemple). En faisant le rapport du nombre de pixels cartographié sur le nombre total de pixels qui composent la façade, il est possible de ramener ces informations à des pourcentages. Pour exemple, la Figure 12 illustre la proportion de pierres portant des signes lapidaires sur l'aile Sud.

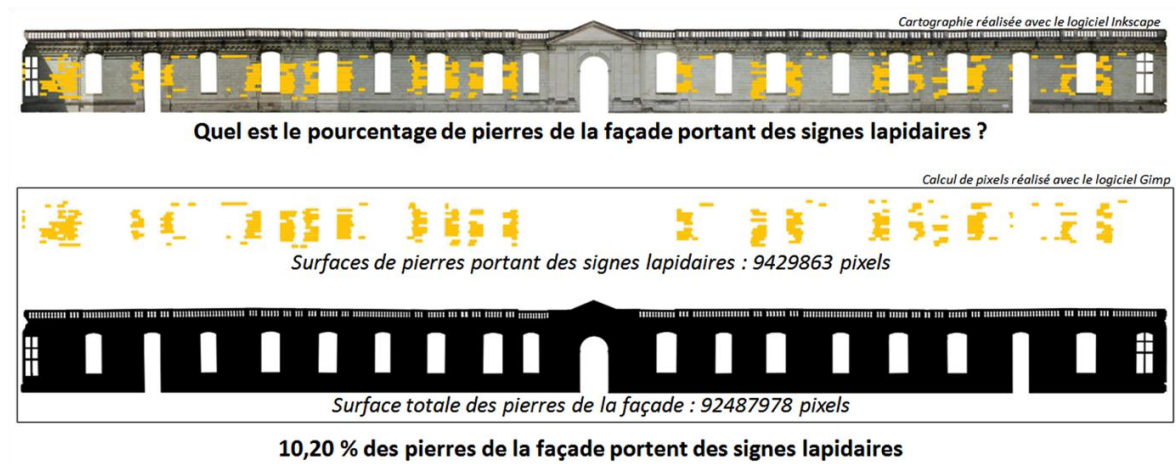


FIGURE 12 : EXEMPLE DE CALCUL D'AIRES SUR L'AILE SUD

Il faut cependant être prudent avec les résultats obtenus avec ce calcul d'aires. Ils ne sont qu'une approximation, due au fait que l'on traite des images en 2D et que l'on ne s'intéresse qu'aux surfaces extérieures des pierres, celles qui sont situées dans le pan de projection de la cartographie, et non au volume qui les compose. De plus, à l'inverse des cartographies de datation des pierres ou des cartographies de nature et provenance des pierres, où les informations ne sont jamais superposées sur une même cartographie, les calques d'altérations peuvent se superposer, une pierre pouvant présenter différentes altérations en même temps. Dans ce cas-là, le calcul statistique devra se faire en plusieurs fois et prendre en compte cette superposition. Dans le cas de la superposition volontaire d'informations, lorsque l'on veut croiser les informations entre elles, c'est la nouvelle aire créée par la superposition dont les pixels seront comptabilisés.

4. CONCLUSION

Ce premier chapitre propose une méthodologie pour l'établissement d'un carnet de santé pour un monument. Les différentes étapes de la construction de ce carnet sont appliquées à deux parties du château de Chambord : la façade sud et la tour du chaudron. La méthodologie de conception de ce carnet est générale et peut s'appliquer à n'importe quel monument.

L'étude montre que les données collectées sont variées, partant des sources les plus anciennes comme les archives manuscrites ou iconographiques, jusqu'aux observations in-situ visuelles ou par des techniques comme la thermographie infrarouge de l'état actuel des parements. Ces données sont ensuite recoupées et synthétisées. Elles peuvent l'être de manière textuelle, bien sûr, mais quoi de plus parlant qu'une illustration ? C'est donc la représentation graphique de ces données qui a été privilégiée, pour laquelle il a été nécessaire de produire un support permettant d'accueillir ces données. Le support choisi et qui sera la base du travail dans ce manuscrit est une frise en deux dimensions des façades étudiées, constituée de photographies assemblées.

Les deux chapitres suivants seront consacrés aux recueils des différents éléments (historique de la construction, état actuel du monument, et estimation de son évolution) nécessaires à la réalisation du carnet de santé de Chambord et plus spécifiquement appliqués à la façade sud et la tour du Chaudron.

CHAPITRE 2

DONNÉES DU PASSÉ DU MONUMENT

Ce chapitre est consacré au recueil des données du passé du château de Chambord et en l'occurrence l'histoire de sa construction et des différents travaux d'aménagement et de restaurations. L'étude décrit plus spécifiquement l'historique de la façade sud et de la tour de Chaudron.

Ce travail consiste en une compilation le plus exhaustivement possible des données écrites ou illustrées, produites et conservées au cours des siècles, dont l'état extrêmement lacunaire et dispersé a rendu la tâche complexe. Les multiples sources mènent à :

- Etablir une chronologie des travaux, remaniements et restaurations subis par le château depuis sa construction.
- Identifier les différentes natures et provenances de pierres utilisées pour la construction et les restaurations du château.
- Constituer une base de données bibliographique concernant l'ensemble des travaux de construction et de restauration de l'aile Sud et de la tour du Chaudron.
- Réaliser une documentation graphique en cartographiant les façades selon différents critères, et établir des recoupements vers une « datation » et une identification de la nature des pierres de ces façades.

1. HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION DU CHÂTEAU

Avant de commencer l'étude des façades de l'aile Sud et de la tour du Chaudron, il convenait de poser le cadre chronologique dans lequel se situent les deux parties étudiées de l'édifice. Cette partie présente donc par périodes historiques les différentes opérations de construction et de restauration qu'a pu subir le château au cours des siècles. Ce travail est un recensement et une réflexion sur les choix techniques effectués pour la restauration, et sur les localisations des carrières exploitées, selon chacune des époques concernées. Cette analyse reflète et illustre des décisions économiques, esthétiques ou scientifiques prises dans l'unique objectif de conserver et restaurer l'édifice.

La difficulté de recensement de ces informations réside dans l'imprécision de certaines données conservées dans les archives, voire de l'absence de données concernant les matériaux. De même, la localisation des carrières est rendue difficile par les changements de toponymes ou par le fait que certaines ne sont plus exploitées depuis des siècles. Pour les XVI^e et XVII^e siècles, ce travail avait été abordé (Mussat, 1991), mais n'a jamais été traité pour les périodes postérieures. Les textes au sujet de l'histoire de Chambord négligent généralement complètement cet aspect.

Les cartes géologiques illustrant ce travail sont des cartes simplifiées et schématiques, réalisées à l'aide d'un logiciel de dessin vectoriel¹⁴, à partir de la géolocalisation des noms de lieu sur Google EarthTM, auquel a été ajouté l'outil des cartes géologiques de la France développé par le BRGM et mis à disposition en ligne depuis 2006¹⁵. L'annexe 3.1 présente un tableau récapitulatif de toutes les pierres employées recensées dans les documents d'archives consultés. Un tableau des caractéristiques physico-chimiques des principales natures de pierres l'accompagne (annexe 3.2).

¹⁴ Le logiciel utilisé ici est **Inkscape**, logiciel de dessin vectoriel libre et gratuit

¹⁵ <http://infoterre.brgm.fr>

1.1. CONSTRUCTION SOUS FRANÇOIS I^{ER}

C'est en 1519 que François 1^{er} débuta la construction du château de Chambord, trois ans après son retour d'Italie, accompagné de Léonard de Vinci. Son nom revient bien souvent dans les nombreux écrits sur les origines du château, sans qu'aucun texte ou plan ne confirme vraiment son rôle dans l'établissement des plans du château. Mais il n'est pas improbable que ses dessins aient inspiré les premiers architectes de Chambord (Lesueur, 1951 ; Guillaume, 1983). L'organisation du chantier de Chambord est connue par des textes épars. Plusieurs équipes se succédèrent au XVI^e siècle. Elles étaient généralement composées d'un commissaire, l'équivalent d'un maître d'ouvrage missionné par le roi, et d'un trésorier, qui gérât les comptes et s'occupait des paiements. Enfin, un contrôleur était chargé de vérifier les dépenses et les différents contrats engagés. Les noms des maîtres maçons sont parfois également connus par les textes et ont fait l'objet de nombreux écrits (Chatenet, 2001 ; Martin-Demézil, 1986).

On sait que les membres d'une première équipe furent désignés en 1519. En 1521, ceux-ci, déjà âgés lorsque le chantier commença, furent remplacés par une deuxième équipe. Peu après le départ de François 1^{er} en Italie et sa mise en captivité, les travaux furent arrêtés durant vingt-sept mois entre juillet 1524 et octobre 1526. Une nouvelle équipe fut alors nommée, remplacée progressivement de 1538 à 1555, date à laquelle les travaux de gros œuvre semblent s'arrêter, sans pour autant être achevés. Cependant, les documents disponibles sont trop incomplets pour nous donner des informations précises sur l'avancée des travaux pour chacune de ces quatre périodes. Il semblerait cependant que la construction, après l'élaboration des fondations, ait débuté par le donjon, puis se soit étendue aux ailes attenantes, pour laisser les offices partiellement achevés à la mort de François 1^{er} en 1547 (Chatenet, 2001).

Au XVI^e siècle, le domaine de Chambord était un vaste marais insalubre. Les fondations du château ont été l'objet de nombreuses interrogations et interprétations. Des textes¹⁶ et des comptes du XVI^e siècle¹⁷, ainsi que des sondages effectués en 1984 par Pierre Lebouteux¹⁸ semblaient conforter l'hypothèse de la présence de pilotis en chêne soutenant un radeau de bois sous le soubassement en pierres (Chatenet, 2001). Or des sondages effectués lors de la

¹⁶ Lettre du diplomate Giovanni Sorenzani, 1550, « Les fondations sont faites comme aux maisons de Vénétie, posées sur des pals et les pierres ajoutées ensuite » (Chatenet, 2001, p. 54 et note 100)

¹⁷ Les rôles de comptes des années 1520 mentionnent, parmi d'autres professions, des « buscherons et manœuvres » (Chatenet, 2001, p. 54)

¹⁸ Architecte en chef des monuments historiques chargé du Cher, de l'Indre et du Loir-et-Cher à partir de 1973 à la suite de Michel Ranjard (de 1945 à 1974), « Les fondations sont assises sur radier et pilotis à 2,5 m de profondeur, en immersion constante sur un lit de chaux pure [...] »

fouille de la cour à partir des années 1999 ont conduit à réviser cette hypothèse, puisqu'aucun pilotis en bois n'a été retrouvé. En revanche, les fondations se développent sur plusieurs niveaux de moellons et mortiers grossiers qui sont surmontés d'un niveau de maçonnerie plus régulière qui vient rejoindre le niveau des maçonneries arasées de l'édifice médiéval préexistant sous une partie du donjon. Ces fondations sont continues sur l'ensemble du château, ce qui permet d'affirmer que l'ensemble des différentes parties du château était prévu dès l'origine (Bryant *et al.*, 2007) (Figure 13).

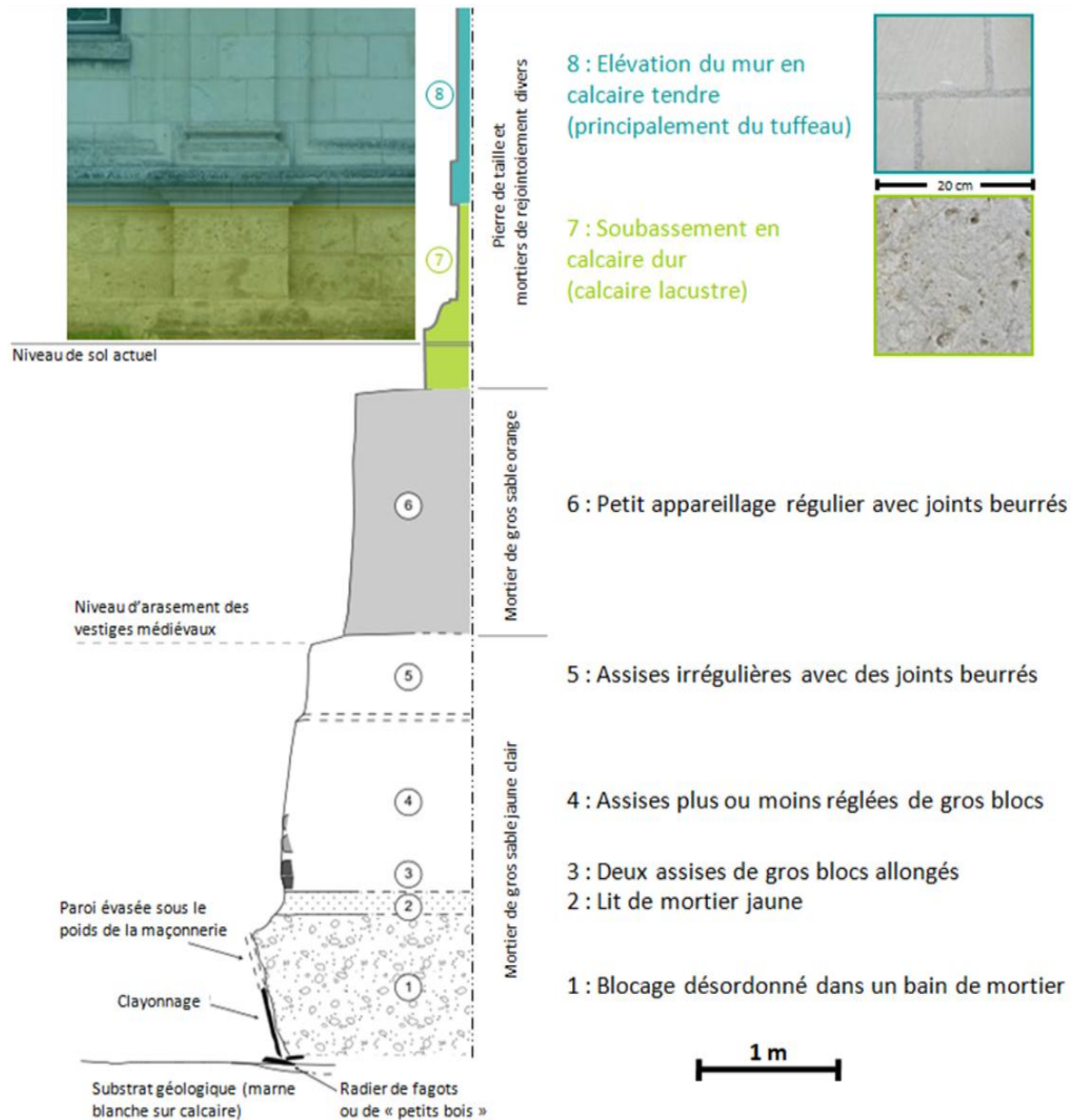


FIGURE 13 : PROFIL DES FONDATIONS ET DE L'ELEVATION DE LA TOUR DU CHAUDRON – COUPE REALISEE AU NIVEAU DE LA COUR (ADAPTATION D'APRES BRYANT *ET AL.*, 2007)

Au-dessus des fondations s'élève un niveau de soubassements, d'une hauteur d'1,50 m environ, surmonté d'un bandeau mouluré et du reste de l'élévation composée de pierres de taille en tuffeau. L'extrême fragilité du tuffeau est bien connue depuis le Moyen-Age. On sait qu'il était nécessaire de construire au moins les soubassements des édifices avec une pierre plus dure (Mussat, 1991). À Chambord, les soubassements ont été construits en calcaire lacustre, appelé calcaire lacustre du Blésois ou calcaire lacustre de Beauce. Il s'agit d'un calcaire plus compact, siliceux à grains fins, possédant une porosité très faible, limitant ainsi les risques de remontées capillaires du sol jusqu'au tuffeau employé en parement (Bigas et Martinet, 2009). Les gisements de ce calcaire sont principalement localisés au nord de la Loire, entre Blois, Orléans, Chartres et Paris (Lorain, 1973 ; Yvard, 1976). Il est difficile de savoir d'où provient la pierre utilisée en soubassement à Chambord, car aucune carrière de calcaire lacustre n'est mentionnée dans les textes conservés. Mussat, en 1991, mentionne sur une carte la commune d'Huisseau-sur-Cosson, mais ne cite aucune source de provenance de cette information dans le texte. On peut noter qu'il existe une carrière et des gisements de calcaire lacustre localisés à Huisseau-sur-Mauves, au Nord de la Loire, au Sud-Ouest d'Orléans. On sait aussi que lors de la construction du pont sur lequel repose la galerie du château de Chenonceau par Philibert Delorme en 1557, celui-ci précise que le calcaire lacustre utilisé en soubassement provient de Chisseau (Chisseaux) et des Hosdes (lieu-dit disparu de la commune de Francueil), deux carrières localisées sur de petits gisements affleurant, à moins de cinq kilomètres de Chenonceau, sur le Cher (Mussat, 1991). On pourrait imaginer que celui de Chambord provenait de ces mêmes carrières, puisqu'on sait aussi qu'à Chenonceau, les tuffeaux utilisés pour l'élévation étaient les mêmes qu'à Chambord. Ces différentes carrières sont localisées sur la Figure 14, mais des doutes pèsent sur ces hypothèses et il serait plus prudent de parler de calcaire lacustre d'une provenance incertaine.

Dans cette étude, ce sont principalement les pierres (et notamment les tuffeaux) utilisées dans la construction des élévations, plus souvent remplacées que les pierres des soubassements, qui vont nous intéresser. Le mot « tuffeau » vient du latin, *tofus*, qui signifie "pierre spongieuse", ce qui définit les principales caractéristiques de cette pierre calcaire tendre : porosité et perméabilité. Ce sont également ces caractéristiques qui vont rendre le matériau sensible aux variations d'humidité de l'air, à la pluie ou aux infiltrations d'eau, accélérant ainsi son processus de dégradation. La composition chimique et les caractéristiques physiques des pierres sont variables d'un gisement à un autre, celles-ci pouvant être de blanc à gris clair ou jaune pâle (Beck, 2006 ; Rautureau, 2001 ; Dessandier, 1995 ; Clément *et al.*, 1990 ; Jeannette, 1985a).

Pour ces élévations, selon Félibien, les pierres utilisées pour la construction du château de Chambord proviennent de six carrières différentes et ont été indifféremment employées et utilisées sans que l'on ait prêté attention à leur dureté ou caractéristiques physiques (Penet, 1963). D'après quelques rares comptes et notes de paiement datés de 1527 à 1547, et notamment un rôle de 1540, des tuffeaux de Fouchault, et de Chilly auraient pu être employés (Cheillé probablement, plus dur et qui aurait été utilisé principalement pour les marches et perrons). Ces textes attestent également le transport de tuffeau de Bourré, provenant des carrières de Bourray (Bourré), Saint-Aignan et Belleroche, utilisé principalement pour les maçonneries, et le tuffeau de Lye, dont la fermeté l'a conduit à être utilisé pour les pilastres, chapiteaux et balustrades de l'escalier à double révolution du donjon (Chatenet, 2001 ; Mussat, 1991). Ces six carrières sont localisées sur la carte de la Figure 14. Pour précision, sous la dénomination de pierre de Bourré, se trouvent à la fois le nom d'une carrière mais également toute une quantité de carrières situées le long du Cher, d'où est extrait un tuffeau considéré comme d'excellente qualité¹⁹, et majoritairement utilisé pour les élévations du château de Chambord.

Les murs sont constitués d'un parement intérieur et un parement extérieurs tous les deux en pierre de taille, l'espace laissé entre les deux étant constitué d'un blocage de moellons et mortier. L'épaisseur des murs varie au niveau des tours en raison de la forme circulaire du parement extérieur s'opposant à l'organisation intérieure des pièces, rectangulaires. Au niveau des murs droits, l'épaisseur est de l'ordre de 1,20 m. La dimension des pierres de taille employées varie parfois sur le château, mais est relativement régulière sur l'aile Sud et la tour du Chaudron. Les pierres ont une hauteur d'assise de 30 cm en moyenne, et sont parfois posées en carreaux et boutisses pour une meilleure résistance (voir annexe 1). À moins d'une erreur de pose, les tailleurs de pierre et les maçons respectaient le litage de la pierre, le lit de pose étant parallèle au lit de carrière.

Au XVI^e siècle, les carrières sont généralement situées aux abords des cours d'eau pour faciliter le transport des matériaux sur de longues distances. Les carrières ouvertes pour ces gros chantiers sont souvent fermées au fil des siècles. Les blocs de pierre arrivaient probablement bruts jusqu'au port de Saint-Dyé-sur-Loire à cinq kilomètres du château, puis étaient ensuite débités sur place selon les besoins (Mussat, 1991). En effet, une grande quantité de tuffeau a été retrouvée dans la cour du château, révélée par les fouilles de 1996. Ce matériau n'existant pas à l'état naturel sur le site de Chambord, il est probable que la taille de

¹⁹ Il s'agit probablement ici d'une meilleure qualité en terme d'uniformité de teinte et de caractéristiques macroscopiques. Les textes mentionnent bien souvent le terme de « qualité », sans que des précisions concernant les critères en eux-mêmes ne soient apportées.

la pierre se faisait sur place, une fois les gros blocs importés, les nombreux déchets servant alors de remblais dans le sol marécageux (Aubourg-Josset et Josset, 1996).

Concernant le mortier utilisé au XVI^e siècle, “il se trouve de bonne nature”, comme le décrit Félibien en 1681, mais aucune précision de composition n’est apportée. Une étude est cependant en cours, pour caractériser les mortiers utilisés dans les différentes phases de construction du XVI^e siècle, à partir des prélèvements réalisés lors des fouilles de l’aile Sud en 1999-2000²⁰.

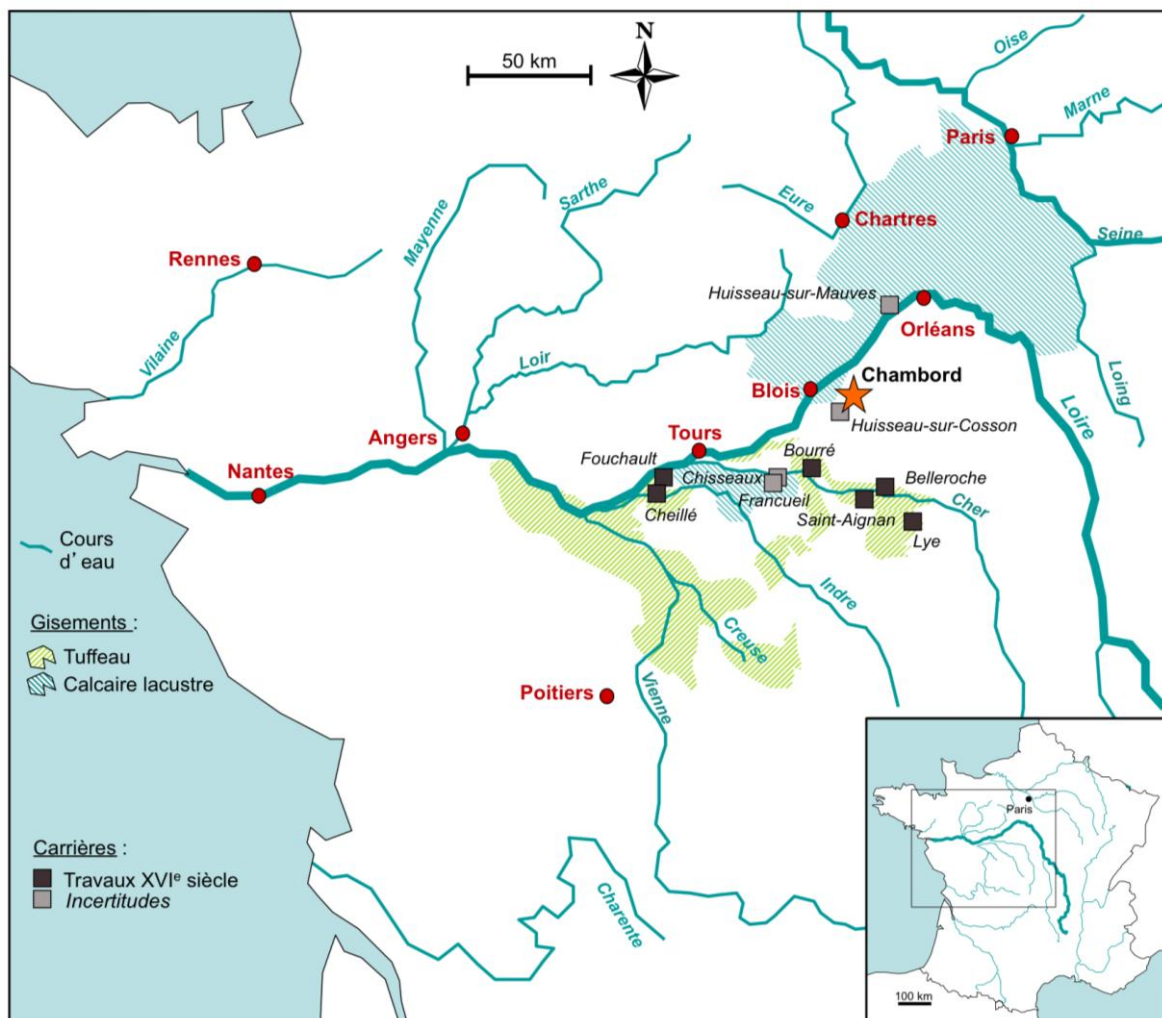


FIGURE 14 : LOCALISATION DES CARRIERES EXPLOITEES POUR LA CONSTRUCTION DU CHATEAU DE CHAMBORD AU XVI^e SIECLE

²⁰ Travail entamé en collaboration avec Simon Bryant, INRAP, annexe à ce travail de thèse

1.2. AMÉNAGEMENTS JUSQU'À LA RÉVOLUTION FRANÇAISE

A la mort de François 1^{er} en 1547, l'ensemble du plan du château est établi. Le donjon était terminé, ainsi qu'une partie des ailes attenantes, l'aile de la chapelle n'étant pas encore couverte d'une charpente. L'enceinte basse des offices n'était élevée que jusqu'aux corniches du premier niveau, les murs de refend n'étaient que partiellement construits et aucune couverture n'était établie sur ces ailes basses (Chatenet, 2001 ; Martin-Demézil, 1986).

On ne construit plus à Chambord après la mort de François 1^{er}. Ce ne sont donc plus des travaux de construction d'ordre structurel qui furent entrepris, mais une longue vague de restaurations, réparations, remaniements ou réaménagements au gré des différents occupants et usages du château. Henri II continua les travaux de son père, en ajoutant aux « F » et aux salamandres des sculptures du château, le « H » et les deux croissants de lune imbriqués, signes qui les caractérisent, lui et son épouse Catherine de Médicis. Sa mort prématurée en 1559 interrompit une fois encore les travaux. François II y fit quelques rares interventions. Durant sa régence de 1560 à 1564, Catherine de Médicis aimait à s'y rendre, et réalisa de nombreux travaux. Charles IX ne s'y rendait presque que pour la chasse, mais fit tout de même continuer ces travaux, nécessaires. En effet, dès 1566, vingt ans après la mort de François 1^{er}, il est déjà fait mention de travaux urgents de restauration « pour éviter la totale ruine d'un si grand et si digne bastiment »²¹. Le problème principal était celui des couvertures, que ce soient les terrasses du donjon qui laissaient passer l'eau, ou les couvertures et charpentes en bois de la tour et l'aile de la Chapelle qui pourrissaient.

Les travaux cessèrent en 1571, et Henri III n'y fit que des décorations intérieures. Avec lui s'acheva la dynastie des Valois. Le premier roi Bourbon, Henri IV, négligea complètement Chambord, à l'inverse de Louis XIII, qui y apporta quelques transformations, mais moins que son frère, Gaston d'Orléans, qui y habita, et y réalisa de grands travaux de restauration. En effet, en 1641, il fit faire des devis de restauration notamment au niveau des huit tours, dont celle qui intéresse notre étude, la tour du Chaudron. Seuls des travaux du donjon et de la lanterne furent en partie exécutés²².

A sa mort en 1660, le château retourna à la couronne, et Louis XIV le visita pour la première fois. C'est à lui que l'on doit l'essentiel des gros travaux de restauration et réaménagement sous la direction de Jules Hardouin-Mansart, petit-neveu de l'architecte

²¹ Lettre de Robertet, secrétaire d'Etat de Charles IX, et rapport du contrôleur des Bâtiments du roi, à la reine-mère Catherine de Médicis le 16 novembre 1566 (Martin-Demézil, 1986, p. 112)

²² Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), minutier Chambord, 3 E 27/280, lettre du 1^{er} mai 1641

François Mansart. Aux emblèmes de François 1^{er} et Henri II succédèrent les soleils du nouveau roi. Il fit donner au château de grandes fêtes, et Molière y joua certaines de ses pièces. Le dernier séjour royal à Chambord fut en 1684 (De la Saussaye, 1834).

Si les travaux réalisés après la mort de François 1^{er} sont très peu documentés, ceux commandités par Louis XIV le sont beaucoup plus. Deux vagues de travaux eurent lieu. Entre 1664 et 1672, ce furent essentiellement des aménagements du domaine qui furent effectués. Louis XIV fit construire les abords du château, en érigeant le village, l'église, en restaurant les murs du parc, etc. Entre 1672 et 1679, le château n'était plus entretenu, et les travaux reprirent en 1680, commençant par la remise en état des abords du château. Les travaux effectués par Jules Hardouin-Mansart entre 1681 et 1685 prirent une autre envergure, et ne se limitèrent pas à des réparations ou restaurations. Il fit construire des écuries à l'ouest du château et des bâtiments autour de la place d'arme²³. Au niveau du château en lui-même, il termina notamment les toitures de l'aile de la chapelle, et fit couvrir d'un étage mansardé les ailes Ouest et Sud des parties basses, afin d'abriter les domestiques (Paquet, 1937 ; Chatenet, 2001).

On sait que de nouvelles carrières furent ouvertes pour les travaux de Jules Hardouin-Mansart à la fin du XVII^e siècle (Martin-Demézil, 1986). Les tuffeaux utilisés sont donc probablement en partie différents de ceux employés un siècle et demi plus tôt au début de la construction de Chambord. On garde également la trace d'un marché passé en 1685 par l'entrepreneur des bâtiments du roi pour de la pierre d'Apremont²⁴, utilisée pour exécuter les chapiteaux, corniches et marches d'escalier. Ce calcaire micritique, dont la carrière est située en amont d'Orléans, à Apremont-sur-Allier, le long de la Loire (Figure 15) est plus résistant et moins poreux que le tuffeau (voir annexe 3) (Brunet-Imbault, 1999). Le calcaire d'Apremont-sur-Allier a été couramment utilisé pour les constructions et restaurations d'édifices au XVII^e siècle, autour et au sud d'Orléans, la cathédrale Sainte-Croix étant construite avec cette pierre. Comme beaucoup d'autres, cette carrière a été fermée, et les lieux d'extraction difficiles à localiser (Rautureau, 2001 ; Lorenz, 1991 ; Gorget, 1990).

Jules Hardouin-Mansart mentionne très largement les matériaux qu'il utilise lors des travaux effectués au château de Chambord entre 1681 et 1685. Il présente essentiellement les travaux de construction des bâtiments de l'avant-cour du château, autour de la place d'arme, autrement dit les actuelles écuries du Maréchal de Saxe. On peut supposer que les matériaux

²³ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), minutier Chambord, 3 E 35/262, 3 février 1681 et 13 mars 1681

²⁴ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), minutier Chambord, 3 E 35/338

employés pour ces constructions sont les mêmes pour les réparations et constructions qu'il fait au château, et notamment sur les communs²⁵. Outre la pierre d'Apremont, il préconise l'emploi de pierre dure pour les soubassements de l'édifice et le seuil des portes, provenant des carrières de calcaire lacustre de Ménard. Pour les parements des murs extérieurs ou de refend, c'est la pierre tendre de « Bouray » (Bourré) qui est de nouveau employée. Ces pierres doivent préférentiellement provenir des carrières de Vineuil, de meilleure qualité. Les pierres du parement doivent être posées en carreau et boutisse. Toutes les plinthes en façade « seront en pierre de Bouray, toutes posées en boutisse ». Les entablements sont taillés dans cette même pierre. Les cimaises au-dessus des entablements sont en pierre de « Marné » (Marnay probablement). La pierre de Belleroy, elle, sert plus souvent aux croisées et aux encadrements des fenêtres (Figure 15).

Le château resta ensuite à l'abandon jusqu'en 1725, date à laquelle il servit d'asile au roi de Pologne Stanislas Leczinski. Les premières mesures de salubrité du marais environnant le château et de gros travaux d'assainissement lui sont dus. Il y résida jusqu'en 1733. De nouveau à l'abandon, c'est ensuite Maurice de Saxe qui le posséda à partir de 1745, et qui y habita de 1748 à 1750, faisant reconstruire notamment les écuries commencées sous Louis XIV, et en transformant certains aménagements intérieurs. En 1750, le château retourna à la couronne et fut donné en 1783 au Marquis de Polignac, qui quitta le domaine au lendemain de la révolution (De la Saussaye, 1834).

Aux différents types de pierres s'ajoutent parfois des mentions des mortiers qui ont été employés dans la construction du château. Le mortier employé dans la construction des bâtiments de l'avant-cour par Jules Hardouin-Mansart serait composé de deux cinquièmes (en volume) de chaux et de trois cinquièmes de sable "bien broyé et incorporé avec ladite chaux". La chaux employée est ordinaire, avec du calcaire local, de même que le sable, qui provient du domaine ou des environs. Les murs anciens construits en tuffeau avec ce type de mortier ne présentent généralement que peu de d'altérations au niveau des joints. En effet, ces mortiers étaient très perméables, et permettaient la libre circulation de l'eau entre les pierres (Thomachot, 1998).

²⁵ Texte conservé aux Archives Nationales, sans date, O¹-1325, liasse 1, pièce n°45

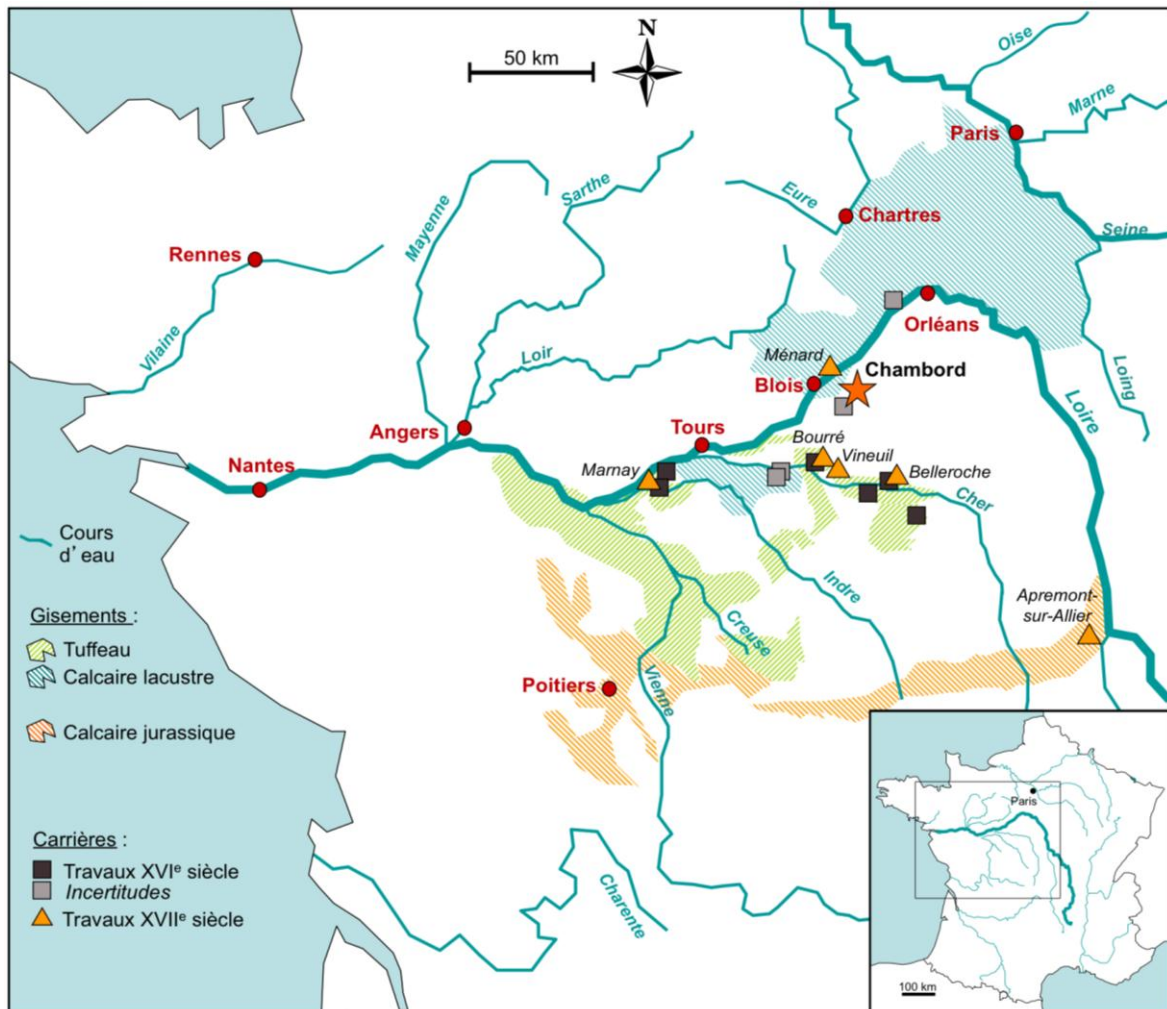


FIGURE 15 : LOCALISATION DES CARRIÈRES EXPLOITÉES POUR LES RESTAURATIONS DU CHATEAU AU XVII^E SIECLE

1.3. TRAVAUX DE LA RÉVOLUTION FRANÇAISE À LA FIN DE LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE

À partir de la Révolution Française et durant plusieurs années, le château fut vidé de son mobilier et les insignes royaux détruits, jusqu'en 1797 où il fut mis en vente sans trouver d'acquéreur. Napoléon le racheta et le mit sous la protection de la légion d'honneur, le sauvant de la ruine. Il donna en 1809 le domaine de Chambord au Prince de Wagram avec la condition qu'il y fit des réparations. Ce ne fut pas le cas et le domaine resta abandonné jusqu'à la chute du premier empire en 1814. En 1821, le domaine fut racheté à la Princesse de Wagram, veuve, qui, ne pouvant faire face aux dépenses, le mit en vente. En effet, Adrien de Calonne avait proposé une souscription à toutes les communes de France pour racheter le

domaine et l'offrir au duc de Bordeaux alors enfant²⁶. Malheureusement, par manque de moyen, le château ne put être restauré avant d'être offert. Sa mère, la duchesse de Berry, y vint en visite en 1828, et y fit réaliser des travaux de restauration des terrasses du château selon les plans et devis proposés par M. Pinault et M. de Calonne. Elle demande à ce que chaque partie du château garde les ornements propres à chaque époque, tout en revenant à l'esprit du monument à l'époque de François 1^{er}. Son fils, le Comte de Chambord, suivit le même dessein. Les travaux ne sont pas aussi bien documentés que pour les périodes postérieures et aucune mention de matériaux n'a été relevée (De la Saussaye, 1834).

En 1830, le domaine fut remis à Charles X au nom de son petit-fils en exil, le duc de Bordeaux qui prit alors le titre de comte de Chambord, année où il devint également Henri V pour une courte période après l'abdication de Charles X en sa faveur. Le régisseur, M. Bourcier, entama alors une grande vague de travaux de restauration, en réhabilitant toutes les maisons du village, et reprenant l'entretien du château. Le château fut classé comme monument historique dès 1840, et il fut envisagé de restaurer les mansardes de l'aile des Princes et de la tour des Princes, bien endommagées. Les travaux de démolition des combles mansardés commencèrent en 1849. Ils furent remplacés par une terrasse après de nombreuses hésitations quant au parti à adopter. En effet, trois solutions avaient été envisagées. Il était soit possible de laisser les mansardes telles quelles et de les restaurer, soit de créer un étage d'attique et des lucarnes en pierres (les mansardes et les logements qu'elles abritent seraient conservées mais la hauteur serait diminuée). Enfin, il était possible de faire une couverture plate en zinc pour revenir à une couverture en toit terrasse comme à l'origine. C'est finalement cette dernière solution qui a été adoptée, entraînant la démolition de l'entablement et du haut des pilastres et leur reconstruction dans le prolongement de l'aile Dauphine avec les mêmes matériaux déposés²⁷. Les mansardes de l'aile Sud et de la tour du Chaudron, en revanche, furent conservées pour le moment (Martin-Demézil, 1986).

Selon les années, et au cours des travaux, les parements altérés sont remplacés en tuffeau de Saint-Aignan²⁸, ou de Belleroche²⁹, aussi employé pour les croisées de fenêtres. Le calcaire d'Apremont n'est plus du tout utilisé à cette période, mais c'est un calcaire d'un même âge géologique qui est utilisé : le calcaire de Chauvigny, un calcaire plus dur et plus résistant que le

²⁶ Le domaine est offert « au nom de la France à SAR Mgr le Duc de Bordeaux au profit duquel le domaine est en conséquence acheté dès à présent », souscription du 5 mars 1821

²⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), devis établis par l'architecte Pinault en 1845 et 1849-1850, côte provisoire 165/188

²⁸ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 3 Travaux, 1848

²⁹ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 4 Travaux, 1850

tuffeau³⁰. Un peu plus tard, de la pierre des « carrières des Brosses » est employée³¹, il s'agit des carrières de tuffeau de Bois-Minhy, situées sur la commune de Chémery, entre Saint-Aignan et Belleroche, le long du Cher. L'extraction débute au XIX^e siècle et cette carrière est toujours exploitée, portant aujourd'hui le nom de « Grande Brosse ». A la même époque, on note l'emploi de deux autres pierres pour la première fois employées. La première pierre citée provient du banc Royal de Saint-Maximin, calcaire lutécien beaucoup plus jeune que toutes les autres pierres citées précédemment, et utilisé pour les balustrades établies sur la tour des Princes³², ou les parties hautes accessibles aux pluies de manière générale. L'autre pierre citée est la pierre de Vitré. Aucune précision sur la localisation de cette carrière n'est mentionnée. Il existe une carrière de pierre à Vitré, en Ille-et-Vilaine, dont l'emploi remonte au moyen-âge (Chauris, 2011). Cependant, il s'agit d'un grès, et aucun emploi de pierre de cette nature n'a jamais été fait à Chambord. De plus, cette carrière se situe dans une zone géographique trop distante de celle dans laquelle se situent les autres carrières exploitées à l'époque. On peut donc s'interroger sur la nature et la provenance de cette « pierre de Vitré » dont l'emploi est noté pour les assises qui constituent les corniches de l'aile Sud³³. Il s'avère que le toponyme de Vitré existe, dans la commune de Saint-Aignan-sur-Cher. Aucune carrière n'est exploitée aujourd'hui, mais il n'est pas impossible qu'il y en ait eu une au XIX^e siècle. S'il s'agit bien de ce lieu, c'est donc du tuffeau qui est désigné dans les archives par la mention « pierre de Vitré » (Figure 16).

À partir de 1883, le domaine et le château de Chambord appartenrent à Robert de Bourbon, Duc de Parme qui en hérita de son oncle, le comte de Chambord. Sous l'égide de Robert de Parme commencèrent alors des travaux de restauration dirigés par Jules Desbois de 1882 à 1894. Les travaux débutèrent par la cour intérieure extrêmement humide et encombrée de gravois qu'il fallut assainir (Desbois, 1894). Des réparations intérieures et extérieures de menuiserie ou maçonnerie suivirent alors, la restauration des maçonneries pulvérulentes de la tour lanterne constituant l'action la plus importante de Jules Desbois et de ses fils qui prirent la suite (Desbois, 1894). Des tuffeaux de Belleroche et de Villentrois ont été utilisés pour restaurer les élévations³⁴ et du calcaire lacustre de Pontijou a été employé pour les restaurations des soubassements³⁵. On note également l'emploi de pierres de Tercé, pierre comparable au calcaire de Chauvigny, dont l'emploi a été très abondant au château de Blois,

³⁰ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 4 Travaux, 1851

³¹ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 6 Travaux, 1864

³² Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 8 Travaux, 1876

³³ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 4 Travaux, 1851 et Fonds 37 Q 5 Travaux, 1856

³⁴ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 15 Travaux, 1898

³⁵ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 17 Travaux, 1904

et plus réservé à Chambord. Son utilisation s'est limitée aux parties hautes accessibles aux pluies, telles que les socles et balustrades³⁶ (Figure 16).

On remarque que la deuxième moitié du XIX^e siècle est abondante en projets de restauration plus qu'en restaurations effectives. Les carrières et les natures de pierres employées se diversifient et s'étendent géographiquement, le tuffeau n'étant pas la pierre le plus couramment utilisée. L'essentiel de ces carrières est toujours localisé près des affluents de la Loire pour les mêmes raisons qu'au XVI^e siècle, c'est à dire pour faciliter l'acheminement vers le lieu de construction ou de restauration. Cependant, des emplois ponctuels de pierres qui ne sont utilisées que dans un temps très court sont notés, comme la pierre de Vitré ou celle de Saint-Maximin, qui ne sont ensuite plus du tout employées, à l'inverse des carrières plus au Sud, de Tercé et de Chauvigny qui continuent à être utilisées aux époques ultérieures.

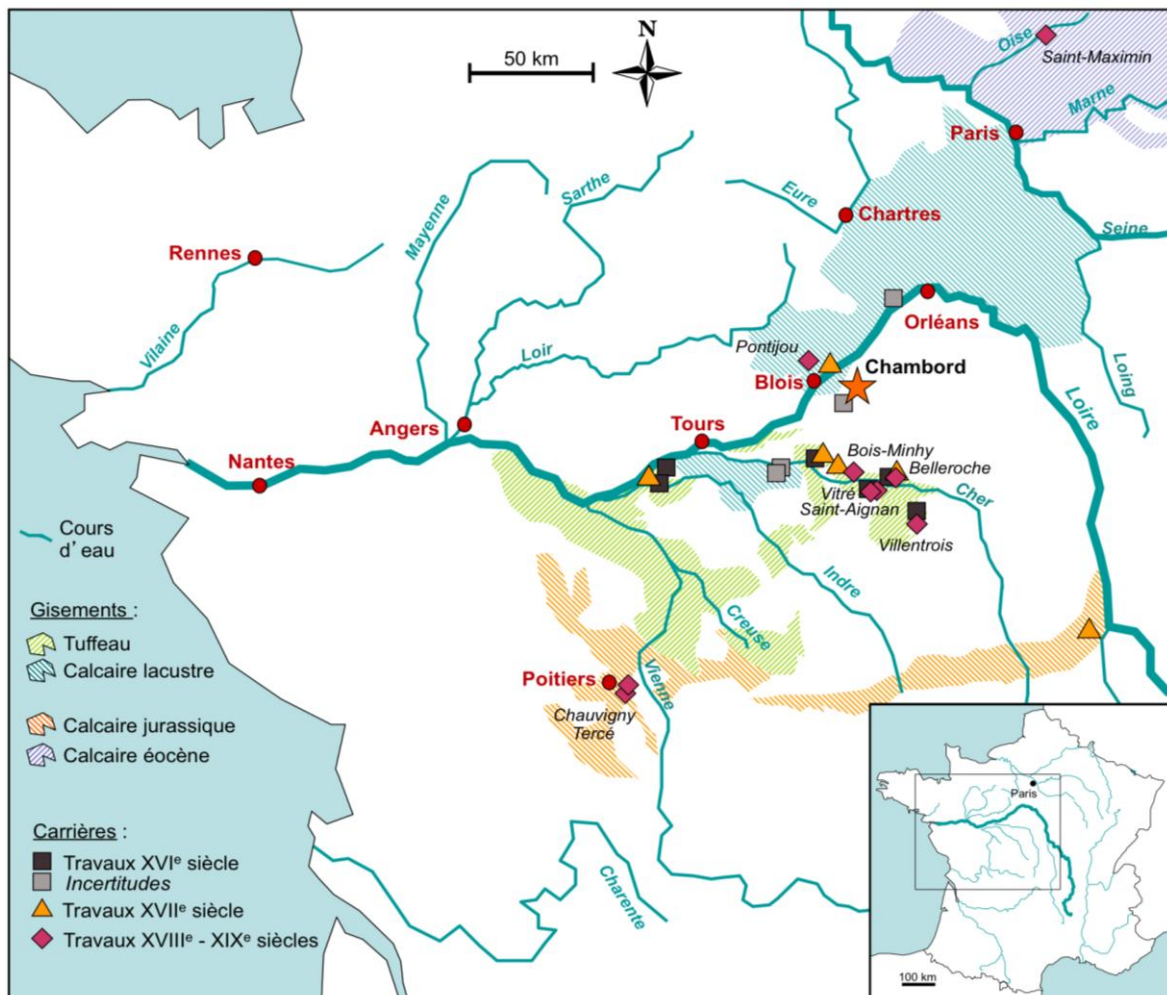


FIGURE 16 : LOCALISATION DES CARRIÈRES EXPLOITÉES POUR LES RESTAURATIONS DU CHATEAU AUX XVIII^E ET XIX^E SIECLES

³⁶ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), Blois, Fonds 37 Q 18 Travaux, 1905

1.4. RESTAURATIONS DU XX^E SIÈCLE

C'est au XX^e siècle que les premiers calcaires plus éloignés de la Loire et de ses affluents, au Sud, sont employés, en raison sans doute de la diminution des transports fluviaux et de l'amélioration et de la généralisation des transports routiers et ferroviaires. La pierre de Salamandre et celle de Lavoux sont tolérées mais uniquement pour le couronnement des murs, car elles sont plus dures que le tuffeau³⁷. La pierre de Lavoux provient de la Vienne, et a une composition chimique proche de celle de Tercé et de Chauvigny, également employées à l'époque. La pierre dite de « Salamandre », utilisée en 1937 pour la réfection des parties hautes de l'aile Sud et de la tour du Chaudron après la démolition des mansardes, provient des carrières de Saint-Même, en Charente-Maritime, dont les caractéristiques sont proches de la pierre de Richemont, exploitée à Pons ou Avy. La pierre de Richemont est plutôt utilisée pour des réfections de parements comme, on le verra plus tard, lors des travaux de l'aile Sud à partir de 1955³⁸ (Figure 17). C'est une pierre calcaire blanche du même âge géologique que le tuffeau, mais considérée comme plus durable, car moins poreuse (annexe 3) (Birginie, 2000 ; Dessandier, 2000). Après que de sérieux doutes eurent été formulés au sujet de la pierre de Tervoux³⁹ celle-ci, plus blanche et plus tendre que la pierre de Tercé mais plus gélive, a tout de même été employée pour des restaurations de mains courantes⁴⁰. On constate qu'au XX^e siècle, les choix de pierres sont plus restreints, et l'utilisation du tuffeau se généralise de nouveau, à l'inverse du XIX^e siècle où l'usage s'était un peu perdu. Les autres calcaires utilisés sont uniquement localisés au Sud de la Loire, et le choix se porte la plupart du temps sur des calcaires ayant le même âge géologique que le tuffeau. Pour les soubassements, on note l'emploi de la pierre de Berchères⁴¹, un calcaire lacustre dont la carrière est localisée à l'Est de Chartres, et de la pierre de Pontijou, qui continue à être exploitée, et qui est actuellement la seule employée⁴², à l'exception de deux restaurations récentes (soubassements et emmarchements), pour lesquelles l'entreprise Lefèvre, spécialisée dans la restauration des monuments historiques, a exceptionnellement utilisé du calcaire de Pontlevoy, en emploi d'un autre chantier. La carrière d'extraction de cette pierre provient des îlots de calcaire

³⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 10 septembre 1947, de Michel Ranjard au directeur de l'entreprise Lefèvre

³⁸ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 47

³⁹ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 15 octobre 1929 de Paul Robert-Houdin à Maurice Lotte

⁴⁰ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 17 octobre de Maurice Lotte à Paul Robert-Houdin et 127 J 41, note datée du 27 août 1939

⁴¹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, 1963

⁴² DRAC – CRMH, documents Chambord T5, devis de l'entreprise Lefèvre en 1994

lacustre qui se situent au bord du Cher, proche de Chisseaux et Francueil, qui pourraient faire partie des pierres utilisées au XVI^e siècle.

Si l'on reprend la chronologie, peu de travaux ont eu lieu au début du XX^e siècle. L'état racheta le domaine au prince Elie de Bourbon en 1930. De nombreux travaux furent alors entrepris, dont notamment l'étanchéité des terrasses du donjon, et des escaliers à vis latéraux. Une autre grande opération de restauration des années 30, sous la direction de Maurice Lotte⁴³, secondé par Paul Robert-Houdin⁴⁴, fut la destruction des mansardes XVII^e qui surmontaient encore l'aile Sud et la tour du Chaudron, et dont l'état d'insalubrité nécessitait une intervention. Les travaux commencèrent par l'aile Sud en 1937 et s'échelonnèrent sur plusieurs années (Paquet, 1937). Les principes de la restauration aux siècles précédents étaient bien différents de ceux du XX^e siècle. L'objectif était de rendre au monument son aspect d'origine, en consolidant ce qui était abîmé, en reconstruisant les parties manquantes et en détruisant tous les ajouts modernes qui nuisaient à l'authenticité du monument (De la Saussaye, 1834). Aujourd'hui, chaque étape de construction a son importance et fait partie de l'histoire du monument. Ainsi, la destruction de ces mansardes en 1937 a posé plus d'interrogations éthiques que lorsque celles de l'aile des Princes ont été détruites en 1850. En effet, devait-on restaurer ces mansardes et garder ainsi une trace des vestiges du passé, ou bien les détruire et revenir à un état plus proche de celui d'origine ? (Paquet, 1937).

Durant la seconde guerre mondiale, le château abrita de nombreuses œuvres du musée du Louvre, qui faillirent brûler dans l'incendie du donjon en 1945. C'est également après la guerre que commencèrent les projets de visites au public et que le domaine s'ouvrit au tourisme. En 1952 eut lieu le premier spectacle son et lumière à l'initiative de Paul Robert-Houdin, architecte des bâtiments de France, et qui constitue toujours l'un des nombreux attraits du château. De grandes opérations de restauration eurent lieu pour valoriser ce monument destiné au tourisme. A cette époque, la restauration des parements en pierre prend une valeur particulière et est exécutée avec plus de rigueur et d'exigence que par le passé, par les architectes en chefs des monuments historiques. En effet, dans un courrier qu'il adresse à M. Lefèvre, directeur de l'entreprise alors chargée des travaux de maçonnerie au château, Michel Ranjard⁴⁵ insiste sur le fait que la « restauration d'un édifice ancien doit être réalisée autant que possible avec la même pierre que celle qui servit à le construire, ou de même nature géologique ». A M. Lefèvre qui lui fait part des difficultés à approvisionner le chantier

⁴³ Architecte en chef des monuments historiques de 1925 à 1945

⁴⁴ Conservateur du Château de Chambord, et architecte en chef des monuments historiques, à l'origine du célèbre spectacle de sons et lumières, dont la première représentation fût en 1952

⁴⁵ Architecte en chef des monuments historiques de 1942 à 1974

en pierres de taille adéquates, l'architecte répond qu'il faut trouver une pierre qui ait, outre la même couleur (pour des raisons esthétiques), mais également les mêmes caractéristiques physiques que les anciennes. Une pierre trop dure par exemple, pourrait avoir des conséquences désastreuses pour celles plus tendres qui lui seraient juxtaposées. Michel Ranjard approuve donc l'emploi de tuffeaux de Bois-Minhy, dont les carrières ont été remises en fonctionnement après une brève utilisation au XIX^e siècle, et employées à titre d'essai à Chambord⁴⁶, et à défaut celles de Villentrois ou de Loches⁴⁷, qui sont proches des tuffeaux d'origine (carrières de tuffeau de Bourré). Quelques années plus tard, l'architecte en chef qui lui succède, Pierre Lebouteux⁴⁸, désapprouve l'emploi du tuffeau de Saint-Cyr-en-Bourg pourtant parfois utilisé pour les parements intérieurs⁴⁹, en raison de sa texture trop tendre et de sa couleur légèrement plus verdâtre que les parements du château de Chambord, la part de minéraux argileux étant plus importante. En revanche, la carrière de Villentrois produit des pierres proches de celles de Lye, blanches durant quelques années, puis qui dorent avec le temps, plus appropriées aux tons dominants des pierres d'origine (Figure 17) (Lebouteux, 1983). En plus d'une légère considération technique, c'est surtout un choix esthétique qui est exprimé ici.

En 1981, le château de Chambord a été classé au patrimoine mondial de l'UNESCO, puis intégré dans le groupe « Val de Loire » en 2000. Enfin, il est devenu un EPIC en 2005⁵⁰. Ces dernières années le château est en constante restauration, des travaux de grande ampleur ont été initiés sous la direction de Patrick Ponsot⁵¹, entraînant la mise en place d'échafaudages se déplaçant de l'escalier à double révolution aux terrasses et toitures, en passant par les voûtes sculptées du dernier étage du donjon.

⁴⁶ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre de mars 1947, de Michel Ranjard à Paul Robert-Houdin

⁴⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 41, lettre du 2 juin 1947, de Michel Ranjard à Paul Robert-Houdin

⁴⁸ Architecte en chef des monuments historiques de 1973 à 1981

⁴⁹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, 1975, 1339 W 564

⁵⁰ Etablissement Public Industriel et Commercial

⁵¹ Architecte en chef des monuments historiques depuis 1981. Il quitte ses fonctions à Chambord en 2011.

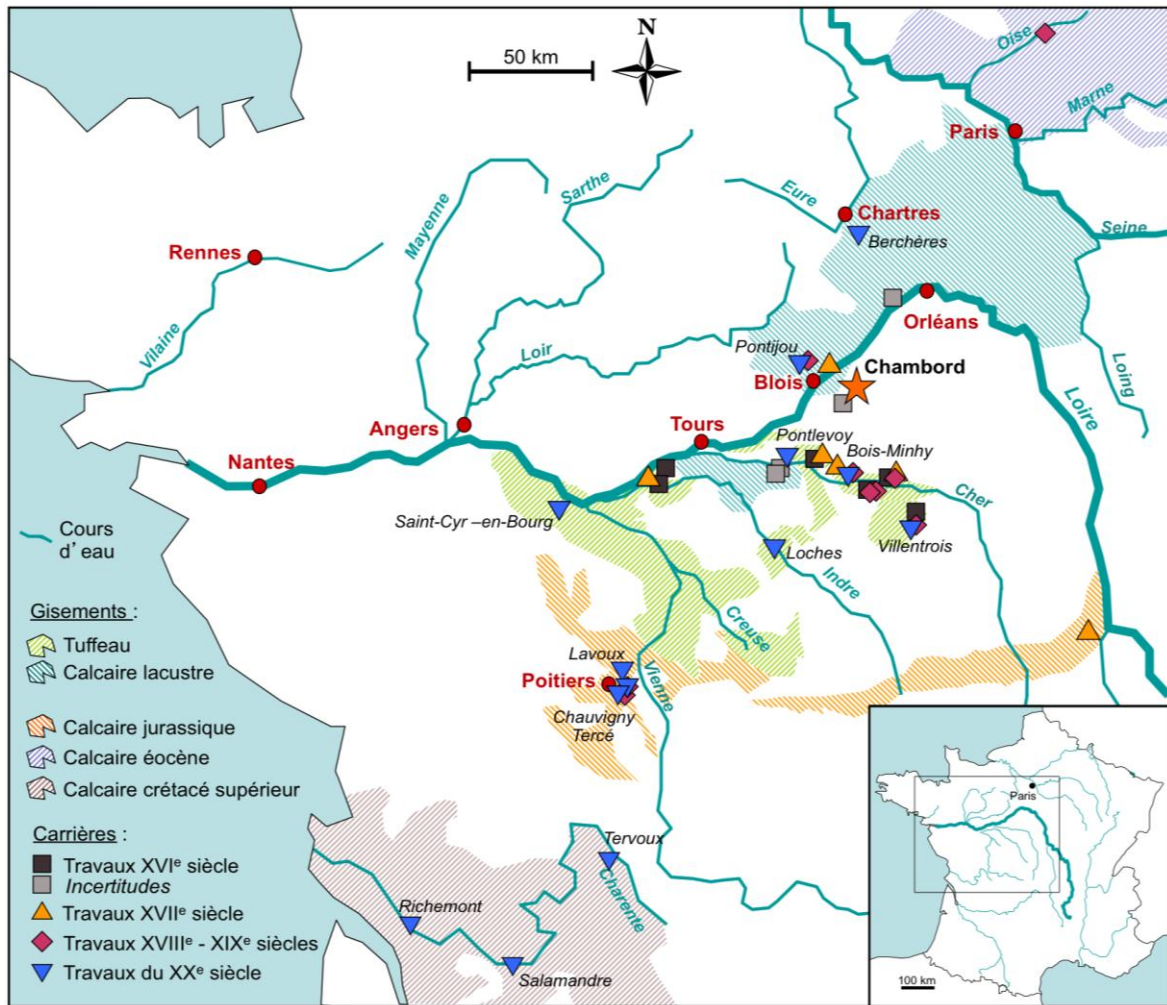


FIGURE 17 : LOCALISATION DES CARRIÈRES EXPLOITÉES POUR LES RESTAURATIONS DU CHÂTEAU AUX XX^E ET XXI^E SIÈCLES

Les devis et mémoire du XX^e siècle ne mentionnent jamais les propriétés physico-chimiques des pierres. En revanche, la notion de dureté est souvent évoquée. Elle définit le type de taille possible (sculptures, parements droits...) et la destination de la pierre (marches, soubassements, croisée de fenêtres...). Cette notion, prise en compte mais empirique au XVII^e siècle⁵², est codifiée au XX^e siècle, et régie par des normes. Il s'agit de la dureté superficielle de la roche, déterminée à partir de la largeur d'une rayure tracée au scléromètre de Martens. A ces duretés correspondent des indices de difficulté de taille, de 1 à 14⁵³ (Bessac, 2004). Ainsi, la pierre de Richemont est notée n°4 (parmi les plus dures de la catégorie « pierre tendre »), celle de Lavoux, 6, (demi ferme), et le calcaire lacustre (pierre de Berchères), est noté n°9 (pierre dure, moyenne)⁵⁴. D'autres classes de désignation de la dureté des pierres

⁵² Texte conservé aux Archives Nationales, sans date, O¹-1325, liasse 1, pièce n°45

⁵³ Indice déterminé à partir des masses volumiques, de la limite de rupture à la compression et de la porosité, d'après la norme Afnor B.10.001

⁵⁴ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, 1963

sont parfois notées. A chaque classe correspond une lettre de l'alphabet, en ordre croissant selon la dureté, le tuffeau de Saint-Cyr en Bourg étant noté E, la pierre de Richemont, G, celle de Chauvigny, J, et le calcaire dur de Pontijou étant noté Q⁵⁵. La dureté fait souvent office de caractérisation, comme l'atteste une lettre de l'architecte Maurice Lotte, précisant que si deux pierres ont une couleur comparable et sont de même dureté, elles seraient équivalentes peu importe leur provenance⁵⁶.

Cependant, au cours du XX^e siècle, les règles de restauration des monuments historiques sont de plus en plus strictes. Ce n'est plus uniquement du tuffeau qui a été employé en restauration, et la question de la compatibilité des pierres entre elles se pose. Cette problématique a parfois été évoquée par le passé : on sait qu'au XVII^e siècle, Félibien fit notamment des essais de porosité pour comparer la pierre d'Apremont à celle de Bourré (Mussat, 1991). Cependant, c'est au XX^e siècle que cette notion est la plus évoquée, et les choix techniques qui sont liés ont souvent varié au cours de ce siècle. Ainsi, dans notre exemple (l'aile Sud et la tour du Chaudron) la pierre de Richemont a été largement utilisée au milieu du XX^e siècle en remplacement du tuffeau, que ce soit au niveau des parements ou bien des parties hautes. Mais quelques dizaines d'années après, l'emploi en remplacement du tuffeau est abandonné, les arrêtes et les parties moulurées en pierre de Richemont étant jugées trop vives (Bigas et Martinet, 2009). Dans les années 1990, les lettres des architectes et des conservateurs retrouvées dans les archives, montrent que les considérations et les lignes directrices de la restauration sont en mutation : la pierre de Richemont est uniquement utilisée pour faire la transition entre les soubassements en calcaire lacustre plus durs, et les parements en tuffeau plus tendres. Enfin, actuellement, le tuffeau de Villentrois est la seule pierre recommandée par les architectes, car il est considéré comme semblable au tuffeau d'origine : le tuffeau de Bourré, très blanc, à grain fin. Ces choix sont illustrés par les cartographies des façades dans la troisième partie de ce chapitre.

Concernant les mortiers, on sait que comme sur beaucoup d'édifices en tuffeau, de petites réparations de maçonnerie sont faites au plâtre. On en mentionne encore l'emploi à Chambord lors des restaurations des terrasses de l'aile Sud par l'entreprise Degaine en 1939, sans précision de la localisation⁵⁷. On connaît cependant maintenant bien ses effets désastreux sur le tuffeau et les calcaires tendres lorsqu'ils sont exposés aux intempéries. Son emploi, généralisé à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, est maintenant déconseillé en

⁵⁵ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, 1975, 1339 W 564

⁵⁶ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 11 août 1929

⁵⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 41, lettre du 22 mai 1939

extérieur (Rolland, 1999). Les travaux des années 1930 sont souvent réalisés avec du ciment (Portland)⁵⁸, bien que l'on sache aujourd'hui que ce n'est pas le matériau le plus adapté, du fait de sa différence de perméabilité qui gêne la respiration de la pierre (Thomachot, 1998) et à cause de la différence entre leurs propriétés mécaniques. Les restaurations récentes accordent en effet beaucoup plus d'attention à la compatibilité des matériaux entre eux. Des études sont menées sur des mortiers, à base de chaux aérienne et de poudre de tuffeau par exemple, dont les caractéristiques physico-chimiques en font un matériau compatible avec le tuffeau (Beck et Al-Mukhtar, 2008 ; Beck *et al.*, 2010). De plus, les pierres remplacées sont parfois patinées artificiellement pour une meilleure concordance des tons entre les pierres anciennes et les nouvelles⁵⁹. Ces patines artificielles sont souvent de nature inconnue car les compositions ne sont pas citées dans les devis et mémoires anciens, et les entreprises actuelles n'en dévoilent pas non plus la composition. Il faudra donc aussi prévoir les dégradations de ces patines artificielles et une éventuelle interaction avec les autres matériaux.

2. CONSTRUCTION ET RESTAURATION DES FAÇADES ÉTUDIÉES

La façade Sud a subi des restaurations régulières au fil des siècles, les résultats seront donc uniquement présentés de manière chronologique depuis les étapes de sa construction jusqu'aux dernières restaurations du XX^e siècle. La tour du Chaudron, en revanche, également profondément remaniée, a principalement été restaurée au XX^e siècle pour ce qui est des parements extérieurs. Les résultats seront plutôt présentés selon deux orientations : les remaniements intérieurs ayant des répercussions sur l'allure extérieure et notamment le percement des fenêtres, puis les restaurations plus « classiques » des parements extérieurs.

L'observation des façades des communs avait déjà été réalisée en 2001 par Eric Johannot. Une part des observations présentées ici lui sont dus. Ajoutées aux résultats des fouilles réalisées en 1999-2000 et 2010-2011 par Simon Bryant, et aux études des archives effectuées dans le cadre de ce travail de thèse, les hypothèses de chronologie de construction et de remaniements de l'aile Sud et de la tour du Chaudron se précisent et s'affinent. Cependant,

⁵⁸ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, rapport de Maurice Lotte, 1938

⁵⁹ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571

seules les informations concernant les parements extérieurs sur jardin seront présentées dans ce manuscrit. Les remaniements intérieurs n'ayant pas d'incidence sur les parements extérieurs ne seront que mentionnés mais non décrits et ni analysés. C'est pourquoi il serait pertinent d'envisager, dans un but documentaire et historique, et dans un autre cadre que cette thèse, une étude conjointe et pluridisciplinaire de l'ensemble de l'enceinte basse du château, souvent délaissée dans les études sur le château de Chambord, afin de synthétiser et de valoriser les résultats obtenus à son sujet ces douze dernières années.

2.1. L'AILE SUD

2.1.1. AU XVI^E SIÈCLE

Les fouilles réalisées en 1999-2000 dans l'aile Sud ont montré qu'il y a eu sous François I^{er} deux phases de construction, le projet initial ayant été légèrement modifié (Bryant *et al.*, 2007). Les murs des façades et certains murs de refend auraient été élevés durant la première phase des travaux, entre 1519 et 1526. L'aile Sud était alors prévue pour être largement ouverte sur l'extérieur, percée de plusieurs petites portes encore visibles aujourd'hui, identifiables par leurs linteaux trapézoïdaux, portant des signes lapidaires comme on peut le voir à la Figure 18 (Johannot, 2001). Puis ces portes auraient été murées durant une deuxième phase de travaux entre 1540 et 1545. A cette date, les espaces internes de l'aile Sud ont été modifiés, et de nouveaux murs de refend ont été créés entraînant la condamnation de la plupart des portes (Bryant *et al.*, 2007). Malgré un manque de correspondance systématique entre les différentes vues, certaines gravures comme celles de Du Cerceau attestent bien de la présence de portes fonctionnelles (on s'intéressera uniquement au plan qu'il a réalisé en 1576-79, plus fiable que la gravure de l'élévation). La gravure de l'élévation par Israël Silvestre en 1678, les montre déjà murées juste avant les grands travaux du XVII^e siècle (Figure 18). La première travée à gauche montre actuellement deux ouvertures murées : une porte surmontée d'une petite fenêtre. En observant le plan de Du Cerceau, on remarque qu'un escalier se trouvait peut-être à cet endroit de l'aile, ce qui expliquerait ces deux ouvertures superposées, qui auraient été murées lorsque l'escalier aurait été condamné. Ce plan de Du Cerceau ne montre pas cette porte et cette baie d'escalier, mais un autre plan de lui, moins connu et conservé au British Museum signale une porte ouverte entre les deux premières baies, et donnant sur cet escalier (Johannot, 2001).

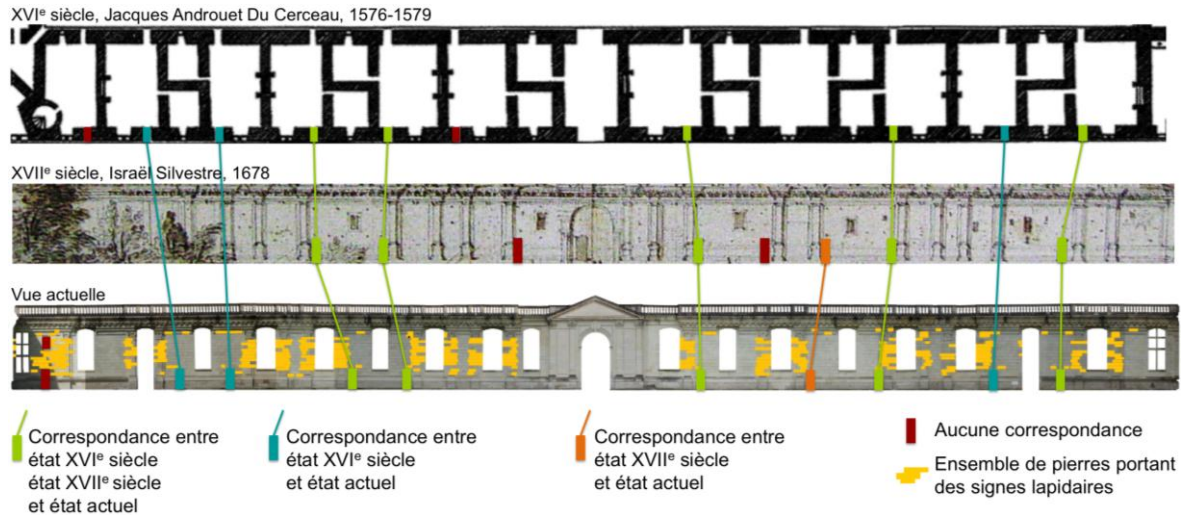


FIGURE 18 : LOCALISATION DES PORTES MUREES

Les fouilles archéologiques récentes ont révélé que les fausses braies, n'occupant actuellement que la façade Est et une moitié du contour de la tour du Chaudron, se développaient à l'origine au niveau de la façade Sud et la façade Ouest, comme semblaient l'indiquer certaines gravures anciennes, comme les plans et élévation de Du Cerceau. Ces fouilles indiquent que ces fausses braies ont été partiellement comblées peu de temps après leur construction, peut-être durant la deuxième phase de travaux durant laquelle les portes donnant sur l'extérieur sont murées⁶⁰. Le comblement, cependant, a peut-être été progressif. En effet, la gravure d'Israël Silvestre de 1678 et un plan datant de 1693 montrent qu'à cette date, elles avaient été bouchées sur presque toute la longueur de l'aile Sud, à l'exception des abords de la tour du chaudron (Figure 19).

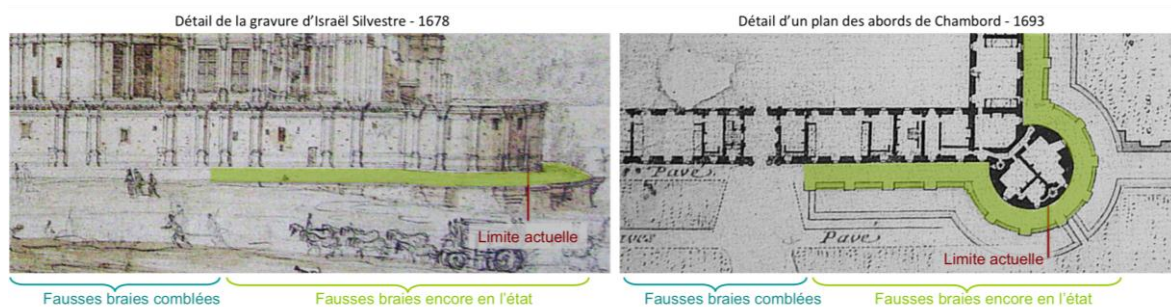


FIGURE 19 : ETAT DES FAUSSES BRAIES A LA FIN DU XVII° SIECLE

De nombreux autres indices que ceux cités plus haut pour l'aile Sud, laissent à penser que pour l'ensemble du château, de nombreux remaniement de plan et des changements de partis

⁶⁰ Suivi des opérations de réhabilitation des réseaux électriques aux abords du château, sondages réalisés par l'INRAP, sous la direction de l'archéologue Simon Bryant

architecturaux ont eu lieu sous François I^{er}, notamment au niveau du donjon (Caillou et Hofbauer, 2007 ; Guillaume, 1983 ; Ranjard, 1973).

Le relevé des signes lapidaires réalisé sur l'aile Sud a révélé qu'en plus des parties sculptées sur lesquelles ces signes lapidaires se développent habituellement, ceux-ci sont parfois visibles au niveau des parements lisses, sur les pierres trapézoïdales des linteaux des portes murées. La disposition des signes lapidaires sur cette aile nous a permis d'individualiser la première travée, comme étant différente des autres. Les signes y sont différents et plus abondants, mais à cela s'ajoutent d'autres indices : la disposition des pierres du chapiteau et des pilastres est différente du reste de l'aile Sud, et la porte murée est couverte d'un linteau différent de toutes les autres portes murée. Ces éléments nous poussent à penser que l'aile Sud, dont la construction a commencé du côté de la tour du Chaudron, a subi une perturbation à l'approche de la tour des Princes (Johannot, 2001) : changement de sculpteurs ? changement d'équipe ? arrêt momentané des travaux ? Quoi qu'il en soit, les travaux furent arrêtés dans les années 1560 et à cette date, l'aile Sud n'avait pas reçu de couvrement. Les façades sur jardin et sur cour étaient élevées jusqu'au premier niveau, comme maintenant, mais les murs de refend n'étaient élevés que jusqu'à 1,50 m environ, comme le décrit Félibien au milieu du XVII^e siècle (Bryant, 2006 ; Bryant *et al.*, 2007).

2.1.2. AU XVII^e SIÈCLE

L'aile Sud reste ensuite dans ce même état jusqu'à la fin du XVII^e siècle, lorsque les premiers travaux de grande envergure sont entrepris par Jules Hardouin-Mansart, commandités par Louis XIV, entre 1681 et 1685. Après déblaiement des abords, l'aile Sud fut nettoyée à partir de 1682. Seule la partie la plus à droite de l'aile Sud, contiguë à la tour du Chaudron, aurait été couverte de voûtes en pierre, dont la partie supérieure avait été abritée sous de la terre afin d'assurer l'étanchéité et la préservation des pierres⁶¹. Lors des travaux de déblaiement, les murs de refend de l'aile Sud ont été en partie détruits et la circulation a été entièrement repensée pour transformer l'aile Sud en cuisines et pièces d'offices⁶² (Chatenet, 2001).

Consécutivement aux aménagements intérieurs, une modification des percements de fenêtres a eu lieu (Bryant, 2000 ; Bryant *et al.*, 2007). En effet, on constate que les fenêtres

⁶¹ Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), minutier Chambord, 3 E 35/338, 29 janvier 1683

⁶² Archives Départementales du Loir-et-Cher (41), minutier Chambord, 3 E 35/338, 20 février 1683

n'ont pas toutes la même largeur, et qu'il en existe deux types. Les premières fenêtres possèdent des piédroits moulurés (en vert sur la Figure 20), les deuxièmes, plus étroites, présentent un encadrement simple, à angle droit (en bleu). Si l'on en croit le plan de Du Cerceau présenté Figure 20, le premier type de fenêtres semble déjà exister au XVI^e siècle. Une croisée en pierre divisait sans doute la baie à l'époque, celle-ci étant figurée sur le plan. Ces fenêtres n'ont pas été modifiées au XVII^e siècle, en dehors d'un agrandissement vers le haut par un arc en plein-cintre, comme le montre l'interruption des moulures. Ces fenêtres devaient à l'origine être rectangulaires (Johannot, 2001). Le deuxième type de fenêtres semble correspondre à des baies plus petites, sans croisée (à l'exception de la deuxième baie) qui perçaient la façade au XVI^e siècle, et qui ont sans doute été agrandies au XVII^e siècle, mais cette fois-ci à la fois en hauteur et en largeur, ce qui expliquerait l'absence de moulures sur les piédroits de ces baies. La porte latérale de droite a dû être à l'origine également une petite fenêtre, agrandie cette fois-ci vers le haut, la droite et le bas, mais pas vers la gauche, où l'on peut voir la moulure d'une ancienne fenêtre de petit format. Elle était sans doute encore une fenêtre au XVII^e siècle, transformée en porte plus tard, la gravure de Le Rouge en 1749 ne montrant aucune porte. La présence ou l'absence de signes lapidaires confirme la datation de ces différentes baies. Pour celles du XVI^e siècle, peu modifiées, de nombreux signes lapidaires sont présents sur les jambages moulurés des fenêtres, preuve qu'aucune modification de la largeur n'a été effectuée. Pour celles élargies au XVII^e siècle, les signes lapidaires sont absents des pierres des jambages.

Enfin, on note quelques anomalies pour la première et la troisième baie à gauche de l'aile Sud. Si l'on en croit le plan, celles-ci devraient être des baies d'origine avec croisée, non agrandies au XVII^e siècle, or elles possèdent des piédroits non moulurés. Nous ne savons pas si ces baies ont bien leur largeur d'origine, mais au vu du plan de Du Cerceau, il semblerait que oui. Peut-être que leur exécution au XVI^e siècle est différente et moins soignée que celle des autres, ces arguments allant dans le sens de l'individualisation des premières travées de la tour, avec une interruption de chantier, ou un changement d'équipe ou de parti architectural (Johannot, 2001), ou peut-être ont-elles réellement été remaniées à une époque postérieure, au XVI^e siècle ou plus tardivement encore. En effet, comme pour la porte de droite, la porte de gauche était par exemple encore une fenêtre au XVII^e siècle.



FIGURE 20 : CLASSIFICATION ET DATATION DES BAIES DE L'AILE SUD

À cette même époque, le Portail Royal a été totalement remanié. Les pilastres qui l'encadrent ont été ajoutés en 1683, et il a été surmonté d'un fronton triangulaire (Figure 21). On observe les vestiges de l'emplacement d'un ancien pilastre, sa base étant encore visible à droite de la Porte Royale, et la pierre correspondant au chapiteau ayant été arasée. Sur la Figure 21, les pilastres ont été numérotés de droite à gauche pour faciliter la lecture. Si l'on observe la disposition des pilastres de la gravure de Sylvestre (avant les travaux de Hardouin-Mansart) avec la disposition actuelle, malgré une disproportion au niveau de l'échelle, le rythme de répartition est comparable pour la majorité de la façade. L'agrandissement de la porte a entraîné l'arasement du pilastre J, et la destruction du pilastre K. Ces traces nous apportent la preuve que lorsque qu'un pilastre ou toute autre partie en relief est arasée au cours de travaux, les pierres ne sont pas systématiquement remplacées, mais simplement retaillées dans le prolongement du parement, l'alternance des pierres à l'emplacement du pilastre J l'atteste : c'est cette même répartition des pierres que l'on observe sur le pilastre I par exemple. La pierre est donc d'origine, en revanche, la nouvelle surface à l'air libre est « neuve ». Ces considérations sont valables pour la partie conservée à droite du portail. En revanche, les volumes du portail en lui-même ayant entièrement été modifiés, il est probable qu'aucune pierre n'a été arasée. Si les remplois après retaille sont possibles, la plupart des pierres ont très probablement été remplacées à partir de pierres neuves de carrières.

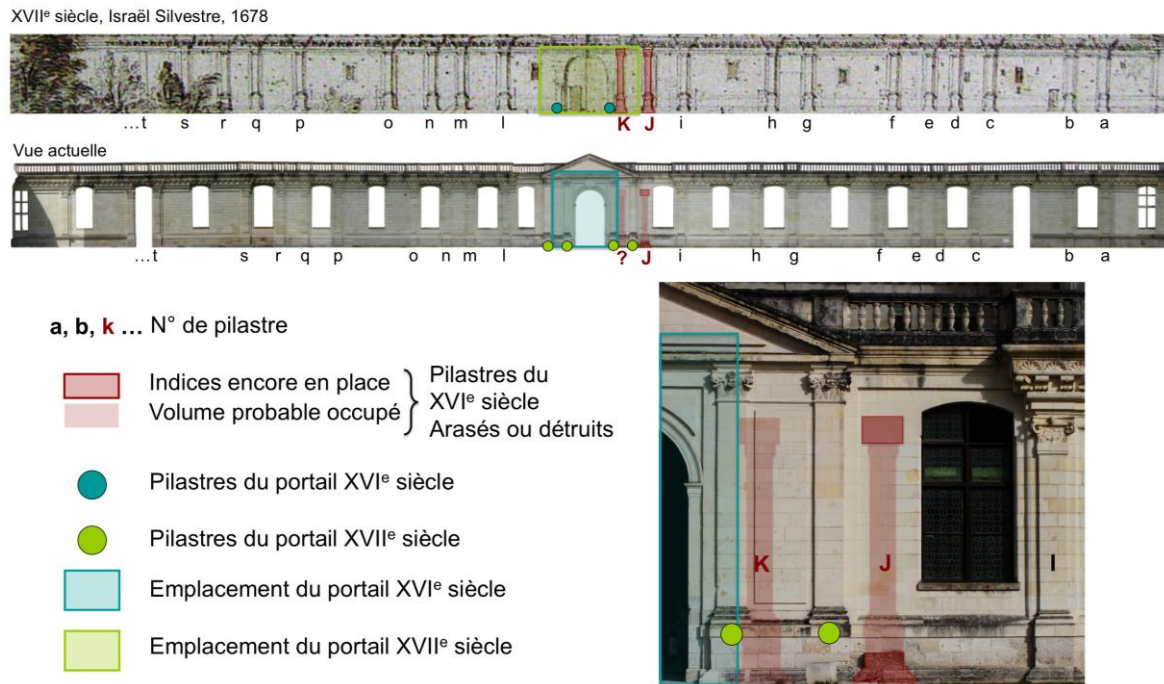
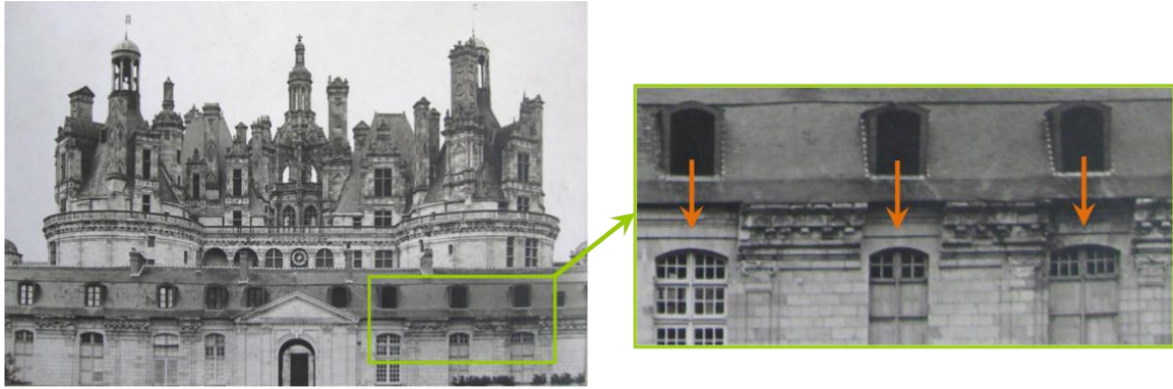


FIGURE 21 : COMPARAISON DES EMBLEMENTS DES PILASTRES DE L'AILE SUD ET DU PORTAIL ROYAL, ENTRE LA GRAVURE DE SYLVESTRE (1685) ET L'ETAT ACTUEL

Mais les travaux de réaménagement de l'aile Sud ne s'arrêtent pas là. Celle-ci fut surélevée d'un étage mansardé. Ce choix architectural n'était qu'une solution provisoire, adoptée par manque de moyens et la nécessité de loger rapidement les domestiques. Le projet de Jules Hardouin-Mansart, si les moyens financiers l'avaient permis, aurait été de surélever les offices de deux étages, comme l'on pensait qu'était le projet initial de François I^{er} (Penet, 1963). Outre l'allure générale du château qui a été profondément modifiée, l'installation de ces mansardes a eu de profonds impacts sur les pierres des façades. En effet, la construction de cet étage mansardé, a engendré la section au droit des fenêtres de la corniche à modillons qui couronne l'aile Sud, les fenêtres des mansardes surplombant directement celles de l'aile (Figure 22). Lors de l'agrandissement des baies et de la destruction partielle des corniches, il est probable que les pierres au-dessus du linteau des fenêtres ont été simplement retaillées. Rien ne permet d'affirmer qu'il y a eu remplacement par des pierres neuves, si ce n'est au niveau du Portail Royal, dont les volumes ont été réorganisés.



Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, photothèque, fond 84/41/1007, cl. 21150 – non daté

FIGURE 22 : PHOTOGRAPHIE DES MANSARDES COVRANT L'AILE SUD MONTRANT LA CORNICHE COUPEE AU DROIT DES FENETRES (NON DATEE - AVANT 1937)

2.1.3. AUX XVIII^E ET XIX^E SIÈCLES

Suite aux travaux de transformation réalisés sous Louis XIV, aucune modification n'est effectuée avant 1748, date à laquelle le Maréchal Maurice de Saxe décide d'installer ses régiments de cavalerie au château (Bryant *et al.*, 2007). Ce n'est qu'en 1783 que sont engagés les travaux de transformation de l'aile Sud en écuries, aile Sud qui était jusqu'alors l'emplacement des cuisines, la circulation intérieure étant totalement modifiée (Chatenet, 2001). Cette fois-ci, cependant, il est peu probable que ces aménagements intérieurs aient influencé l'agencement extérieur, et que des modifications de maçonneries aient eu lieu en façade car aucun document d'archives n'en contient la trace.

Les habitations successives et l'instabilité du statut du château de Chambord durant les siècles qui suivent ont fait qu'aucune restauration majeure n'a été effectuée sur l'aile Sud. Ce sont essentiellement des travaux d'entretien du château, et la plupart du temps intérieurs, qui sont réalisés. Ils sont par ailleurs très bien documentés à partir du début du XIX^e siècle⁶³. On constate notamment que durant tout le XIX^e siècle, les travaux de réparation des couvertures des parties basses sont très fréquents, ce qui corrobore l'hypothèse que ces mansardes avaient été établies sous Louis XIV à titre provisoire, ou du moins sans grand soin.

En 1856, des devis mentionnent un projet de restauration des maçonneries de l'aile Sud, de la porte Royale à la tour des Princes, du côté de la cour comme du côté des jardins⁶⁴. On apprend que des cubes de tuffeau de Belleroche seraient employés pour le cordon de la façade

⁶³ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q Travaux

⁶⁴ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 5 Travaux, 1856

(le stylobate, sans doute) et pour huit appuis de croisées du côté du midi, sans plus de précision. Il y a dix baies à gauches du Portail Royal. Comme ce devis ne mentionne que huit baies, la porte et la fenêtre à l'extrême gauche avaient donc déjà bien été restaurées et transformées, en 1856, comme l'atteste la photographie de la Figure 23. Selon ces devis, les trois assises supérieures de la corniche ainsi que les deux en-dessous auraient également été remplacées en « pierre de Vitré », provenant probablement de carrières de tuffeau situées sur la commune de Saint-Aignan (voir 1.3). Bien que précises quant à la localisation des pierres remplacées, ces informations sont tirées de devis auxquels aucun mémoire n'est associé. Rien ne nous permet d'affirmer que les travaux ont réellement été réalisés. En 1856, on voit que les balustrades ont été installées, mais celles-ci, notamment la petite partie faite au-dessus de la première travée de l'aile Sud, ont été partiellement restaurées en 1868⁶⁵. Il ne reste aujourd'hui aucune trace de ces travaux, le couronnement de l'aile Sud ayant été de nouveau restauré, et les pierres remplacées, au XX^e siècle. Les pierres ajoutées entre 1851 et 1856 et encore visibles aujourd'hui sont donc uniquement celles des meneaux de la première fenêtre (probablement du tuffeau de Belleroy, pierre généralement utilisée à l'époque pour les croisées et appuis de fenêtres, comme on le voit dans les devis et mémoires précédemment cités dans ce chapitre), et les pierres de calcaire lacustre encadrant le bas de la porte de gauche, du calcaire de Pontijou probablement, également employé à l'époque.

Malheureusement, les cartes postales et photographies anciennes ne nous renseignent pas sur la date à laquelle la porte de droite a été transformée de fenêtre en porte. On peut imaginer qu'elle l'ait été entre 1749 (la gravure de Le Rouge) et 1851, date de la première de ces photographies de la Figure 23. On remarque en revanche l'apparition de meneaux à la croisée de la fenêtre à l'extrême droite de l'aile Sud, probablement installés entre 1856 et 1900, mais aucune archive n'en contient la trace. Comme nous l'avons précisé plus haut, les percements ou agrandissement de baies sont rarement accompagnés de remplacement de pierres neuves en façade. En revanche, les meneaux en pierre installés sur la fenêtre de droite pourraient avoir été sculptés dans du tuffeau de Belleroy comme pour la fenêtre à l'extrême gauche.

⁶⁵ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 7 Travaux, 1868

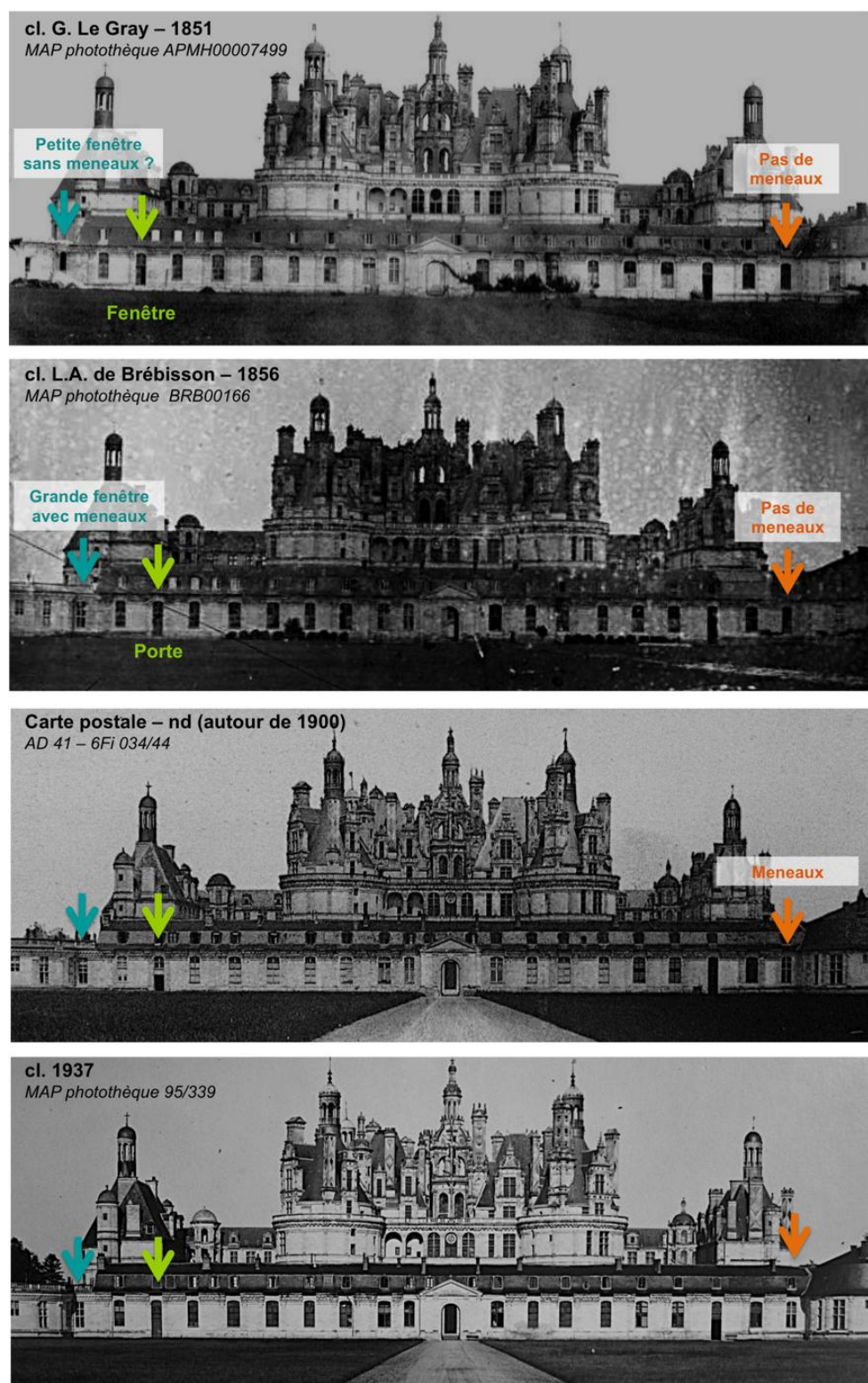


FIGURE 23 : REPRESENTATION DE LA FAÇADE SUD ET EVOLUTION DE LA PORTE LATÉRALE GAUCHE

Les travaux effectués par les restaurateurs Desbois père et fils entre 1882 et 1894 ont essentiellement concerné le donjon et les parties hautes, nous n'avons donc que peu d'informations concernant les travaux qu'ils ont pu effectuer sur l'aile Sud ou la tour du Chaudron. Les devis de travaux conservés aux archives départementales du Loir-et-Cher ne

nous fournissent que des informations sur des projets non réalisés. On voit plusieurs mentions apparaître dans des devis de 1879, 1883 et 1886 au sujet de travaux de réfection de la porte Royale. Elle aurait été grattée et remastiquée, des pierres des pilastres et murs de l'entrée auraient été remplacées, et des pilastres auraient été repeints couleur pierre⁶⁶. A cela s'ajoutent des gravures réalisées par les Desbois à la fin du XIX^e siècle, concernant des projets de restaurations de la Porte Royale⁶⁷. Peut-être que ces devis et ces gravures sont liés, mais il n'existe aucun mémoire d'exécution des travaux, et ces projets de restauration n'ont pas abouti. De plus, de nombreux plans et schémas montrent que le projet de détruire les mansardes comme sur l'aile des Princes avait déjà été envisagé à cette époque, illustrant les choix techniques possibles pour l'établissement des terrasses⁶⁸ et la morphologie des rambardes ainsi que le dénombrement et la position des piliers de ces rambardes⁶⁹. Ces restaurations n'ont pas eu lieu sous la direction des Desbois, mais leurs études préliminaires graphiques ont certainement servi de support aux plans accompagnant les devis ultérieurs lors de la réalisation effective de ces travaux presque cinquante ans plus tard.

2.1.4. AUX XX^e ET XXI^e SIÈCLES

En 1934, dans une lettre qu'il adresse à l'architecte en chef Maurice Lotte, Paul Robert-Houdin indique qu'il faut prendre une décision quant aux couvertures de l'aile Sud et de la tour du Chaudron. Il mentionne également que de gros travaux intérieurs doivent être effectués⁷⁰. C'est en 1937 que les mansardes sur l'aile Sud ont été abattues. Des terrasses en béton les ont donc remplacées, modifiant complètement l'aspect général pour revenir à l'aspect initial perdu depuis des siècles. La décision a été prise par la Commission des Monuments Historiques de rétablir les terrasses, mais de ne pas installer de balustrades⁷¹, même si des devis ont quand même été faits à l'époque⁷². Elles ont finalement été posées près de trente ans plus tard. Il a fallu rétablir les parties de corniches à modillons qui avaient été supprimées lorsque les fenêtres avaient été percées et agrandies au XVII^e siècle, de la même manière que cela avait déjà été rétabli sur les fenêtres de l'aile Dauphine en 1850. Outre les parties au droit des fenêtres, certaines coquilles et modillons des pierres encore en place de la

⁶⁶ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 8 Travaux, 1879 ; et 37 Q 9 Travaux, 1883 et 1886

⁶⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), plans, Fonds 56 Fi 409, 410, 411, 413, 414, 428, 439

⁶⁸ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), plans, Fonds 56 Fi 402, 422, 437, 438

⁶⁹ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), plans, Fonds 56 Fi 412, 417, 462, 465, 467, 469, 470

⁷⁰ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, 22 septembre 1934

⁷¹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, Rapport de la Commission des Monuments Historiques, 15 novembre 1935

⁷² Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/08, 1938

corniche ont également été remplacés, à cause de leur état très délabrés au début du XX^e siècle, comme le montrent les photographies de la Figure 24 prises juste avant la démolition des mansardes.



FIGURE 24 : DETAILS DE L'AILE SUD JUSTE AVANT LA DEMOLITION DES MANSARDES ET LA RESTAURATION DES CORNICHES EN 1937, EN COMPARAISON AVEC DES VUES ACTUELLES

En 1937, des devis et mémoires détaillés accompagnés de plans très précis des différentes pierres remplacées ont permis de distinguer les pierres d'origine des ajouts du XX^e siècle⁷³. C'est une pierre plus dure qui a été employée, appelée « pierre de salamandre ». Il s'agit en fait de calcaire de Charente, provenant des carrières de Saint-Même (Figure 17). Les dessins et plans accompagnant les devis et mémoires mentionnent, en plus de la pierre de Salamandre, le remploi de pierres du château, qu'on imagine être du tuffeau. Des photographies de la façade prises durant les travaux permettent de distinguer ces remplacements, les nouvelles pierres posées étant plus claires que les pierres d'origine laissées en place, plus foncées à cause d'altérations en surface (sans doute des colorations d'origine biologique). De plus, les dessins accompagnant les devis afin de localiser les pierres remplacées et les dispositions de pierres de taille observées sont totalement concordants (Figure 25). Le couronnement de la corniche devant servir de socle pour accueillir les balustrades futures est précisé être en pierre de Lavoux.

Les photographies des corniches dans cet état de délabrement (Figure 24) semblent corroborer la thèse selon laquelle les travaux précisés dans les devis de 1856⁷⁴ n'ont jamais été réalisés. De plus, l'état de délabrement des parties saillantes de la façade (stylobate, corniche),

⁷³ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, devis des travaux effectués par l'entreprise Degaine en 1937, sous la direction de M. Lotte

⁷⁴ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 5 Travaux, 1856

est le même pour les deux côtés de la façade (Figure 25). Les devis de 1856 ne concernant que la partie de gauche, si les travaux avaient été réalisés, l'état des deux parties aurait été différent.

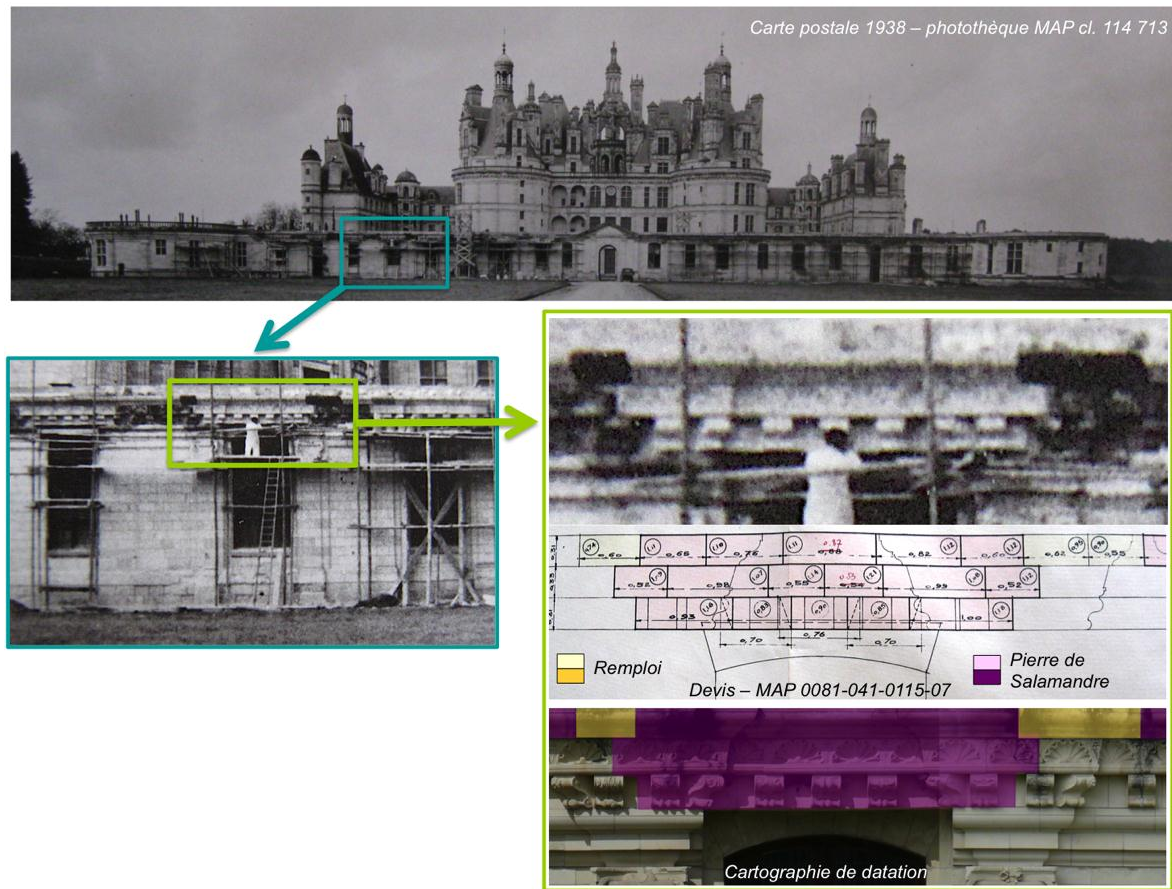


FIGURE 25 : REMPLACEMENT DES PIERRES DE LA CORNICHE AU DROIT DES FENETRES EN 1937 – BAIE N°5 DE L'AILE SUD

Durant la seconde guerre mondiale, le château n'a que peu été entretenu, et c'est avec l'architecte en chef des monuments historiques, Michel Ranjard, que débutent de vastes opérations de restauration au niveau de l'aile Sud, à partir de 1947. On peut citer un ensemble de petites notes retrouvées dans le fonds Robert-Houdin conservé aux archives départementales du Loir-et-Cher, dont l'une mentionne en 1953 la « réparation des maçonneries des murs extérieurs des communs, piédroits et allèges de baies »⁷⁵. La note est totalement isolée des devis et mémoires qui lui correspondent, conservés à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine et datés de 1953 à 1955⁷⁶. Ces documents concernent les travaux de transformation des salles d'accueil du public dans l'aile Sud. Malheureusement, aucun dessin n'est associé à ces devis. Il aurait pu être intéressant d'avoir des plans avec la localisation des pierres remplacées. On lit dans ces documents que les maçonneries

⁷⁵ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 37, 4 août 1953

⁷⁶ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/15

extérieures « salpêtrées », autour de la quatrième baie en partant du Portail Royal (baie n°15), correspondant à la grande salle d'accueil, auraient été démolies sans emploi, et les nouvelles pierres (en pierre de Richemont) auraient été fichées au mortier de ciment⁷⁷. De plus, en 1954 sont envisagés des travaux de restructuration des toilettes publics de l'aile Sud avec comme travaux prévus la reprise des maçonneries de la baie n°16, le devis étant cette fois-ci accompagné d'un plan faisant figurer les remplacements de pierre⁷⁸. La Figure 26 montre l'état très délabré de cette baie avant cette restauration. En comparant avec une vue de cette même baie actuellement, on peut aisément se rendre compte des pierres qui ont été remplacées et celles qui ont été conservées. En revanche, on sait qu'un peu plus tard, il y a eu d'autres restaurations dans cette même zone (1964). Les pierres remplacées sont de même nature et de dates de restauration proches. Il est donc difficile de les différencier, et en l'absence de photographies de cette zone entre 1955 et 1964, c'est uniquement le facies de mortiers de rejointoiement employés qui permet de différencier les deux opérations de restauration.



FIGURE 26 : ETAT DE LA BAIE N°16 DE L'AILE SUD AVANT ET APRES LA RESTAURATION DE 1955

Quelques années après, comme évoqué juste au-dessus, les travaux de réfection des maçonneries de l'aile Sud reprennent. Les premiers devis et mémoires datent de 1962 et font état de la restauration générale des communs de la tour des Princes au Portail Royal y compris. C'est de la pierre de Richemont qui a encore une fois été utilisée. L'ensemble des moulures de l'entablement de la première travée à la onzième (soit jusqu'à la neuvième baie) aurait été repris. Un certain nombre de pierres auraient également été reprises en parement. Ces pierres sont soigneusement dénombrées mais non localisées graphiquement. La travée n°12 juste avant le portail et celle juste après ont été reprises au niveau de l'entablement et de l'encadrement de baie. Le Portail Royal a été aussi presque entièrement refait, ce qui était nécessaire au regard de l'état de délabrement avancé visible sur la photographie prise en 1947

⁷⁷ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/15, devis du 25 juillet 1953

⁷⁸ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/16, devis du 23 décembre 1954

(Figure 27). Certaines pierres des soubassements de cette partie de gauche auraient également été reprises en pierre de Berchères⁷⁹. Ces mêmes restaurations auraient ensuite eu lieu à partir de 1964-1965 sur la partie droite de l'aile Sud⁸⁰. Malheureusement, pour cette deuxième tranche de travaux, seule la page de couverture du devis est conservée à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, le contenu du devis ayant disparu.

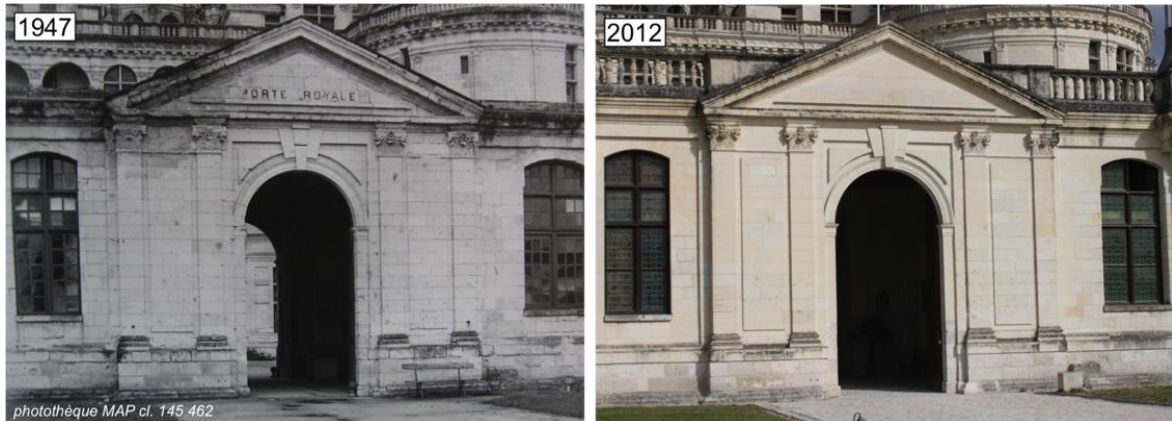


FIGURE 27 : COMPARAISON DE L'ETAT DU PORTAIL ROYAL EN 1947 ET EN 2012

Etant donné que nous avons affaire à des devis sans mémoires associés et qu'une partie de ces devis a disparu, les travaux ont-ils réellement eu lieu. On peut sans problème affirmer que oui. En effet, d'une part, on sait par ces mêmes archives que les devis ont été approuvés. D'autre part, le faciès actuel des pierres nous indique clairement que celles-ci ont été remplacées. En effet, les photographies datées d'après la seconde guerre mondiale montrent le Portail Royal (Figure 27) et les corniches non restaurées en 1937 en très mauvais état. On remarque également qu'en 1947, les rambardes n'avaient pas encore été mises en place après la démolition des mansardes dix ans auparavant. Des photographies conservées dans les archives de Michel Ranjard montrent qu'il avait effectué des montages photographiques pour juger de l'effet d'une balustrade sur les façades.

Toutefois, les travaux effectués en 1962 au niveau de l'entablement dans la partie gauche sont sujets à discussion. On sait grâce aux dessins des devis et mémoires et grâce aux photographies de la Figure 25, que toutes les pierres de la corniche et de l'entablement n'ont pas été remplacées en 1937. Or, l'observation du faciès actuel des pierres nous indique que toutes les pierres semblent avoir été changées, et que de surcroît, aucune n'est en tuffeau. Il y a donc deux options :

⁷⁹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, devis du 28 Décembre 1962

⁸⁰ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/26, devis du 18 janvier 1965

- Soit une partie des pierres a bien été changée selon les devis et mémoires de 1937, puis, les autres pierres des corniches qui n'avaient pas été remplacées l'ont été en 1962, sans toucher à celles posées en 1937. Le fait que les dimensions et la position des pierres actuelle concorde parfaitement avec les dessins des devis de 1937 nous conforte dans cette hypothèse.

- Soit une partie des pierres a bien été changée en 1937, mais les travaux de 1962 ont entraîné la reprise à la fois des pierres non remplacées en 1937, et de certaines pierres qui avaient été changées en 1937. En effet, un nombre important de coquilles et modillons sculptés semble avoir été restauré si l'on en croit les devis. Cependant, ce compte ne correspond ni à la totalité des coquilles et modillons présents, ni au nombre restant si l'on exclut ceux remplacés en 1937. De plus, dans une lettre de Paul Robert-Houdin à André Lotte au moment des travaux de 1937⁸¹, les corniches réalisées à cette date sont signalées comme étant de très mauvaise qualité. Peut-être il y a-t-il eu une rapide détérioration, obligeant Michel Ranjard à refaire presque la totalité des corniches ?

Quoi qu'il en soit, il est impossible de discerner ces deux faciès de pierre, les remplacements n'étant pas très éloignés l'un de l'autre dans le temps, et la nature de pierre employée dans les deux cas étant très semblable. Dans ce cas-là, le faciès des mortiers de rejointoiement n'aide pas non plus. Si la deuxième solution pourrait être la bonne, en l'absence de plus de précisions confirmant la réalisation des travaux et la localisation des pierres remplacées, c'est la première hypothèse qui sera illustrée dans la partie suivante, pour la cartographie de datation des pierres. On considèrera que les pierres en tuffeau qui sont notées sur les plans de 1937 comme étant des remplois ont toutefois été remplacées en pierre de Richemont en 1962, puisqu'il n'y a plus de tuffeau conservé au niveau des assises supérieures de la corniche.

Les balustrades en pierre de Richemont ont ensuite été installées sur l'aile Sud à partir de 1964-1965, sur le modèle et dans la continuité de celles déjà présentes sur la tour des Princes. Les rambardes en tuffeau qui avaient déjà été posées au-dessus de la première travée à gauche entre 1851 et 1856 ont également été remplacées⁸².

Les archives redeviennent ensuite lacunaires. On trouve la mention dans une note, au 30 juillet 1970, de la nécessité d'effectuer des travaux de consolidation du gros œuvre et de maçonneries extérieures au-dessous des corniches, entre autres sur l'aile Royale, de la tour des

⁸¹ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 14 mai 1937, de Paul Robert-Houdin à André Lotte

⁸² Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, devis du 25 février 1963 et 0081/041/0115/26, devis du 24 Décembre 1964

Princes à la tour du Chaudron⁸³, sans plus d'information. Les travaux qui ont ensuite lieu sur cette partie du château concernent les aménagements intérieurs, pour améliorer l'accueil du public notamment. Aucune incidence majeure n'est notée sur les maçonneries extérieures côté jardin, si ce n'est un petit remplacement ponctuel en 2012 au niveau de la première assise du soubassement à l'entrée du Portail Royal, sur le jambage de droite lorsque le seuil de porte a été refait. Une pierre a été remplacée, les autres ont été débarrassées de la mousse qui les recouvrait et légèrement rejointoyées. C'est du calcaire lacustre de Pontlevoy qui a été exceptionnellement employé (Figure 28).

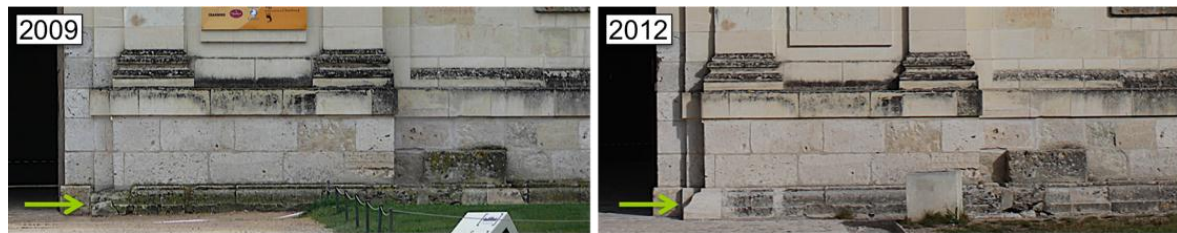


FIGURE 28 : REMPLACEMENT D'UNE PIERRE SUR LE JAMBAGE DE DROITE DU PORTAIL ROYAL

2.2. LA TOUR DU CHAUDRON

2.2.1. RÉAMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS ET CONSÉQUENCES SUR LES PERCEMENTS DES FAÇADES

On sait que l'édification de cette tour est contemporaine de la première période de construction de l'aile Sud, entre 1519 et 1526 (Bryant *et al.*, 2007). Elle n'a subi que peu de remplacements de pierres en façade, par rapport à l'aile Sud ou d'autres parties du château comme le donjon. Moins de mentions de travaux ont donc été répertoriées dans les archives. De plus, en raison de sa position en retrait, moins importante que l'aile Sud en terme d'image et sans doutes de priorité, cette tour souffre d'un défaut de documentation.

Les pilastres de la tour sont disposés à intervalles réguliers et les baies semblent répondre uniquement à l'organisation interne du bâtiment sans souci de régularité. L'intérieur de la tour du Chaudron se développe sur deux niveaux : un rez-de-chaussée et un entresol. En l'absence de sources iconographiques fiables et représentant toutes les travées, il est difficile de savoir si le percement des fenêtres actuel correspond à celui d'origine ou bien si les façades de la tour ont subi des remaniements. Des déductions ont été faites à partir d'observations de terrain,

⁸³ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 555

croisées avec l'étude de plans anciens (qui semblent plus fiables que les gravures d'élévations et qui ont l'avantage de fournir des informations pour les parties généralement cachées sur les vues d'élévation), permettant d'aboutir à certaines conclusions quant à la chronologie des percements des différentes baies (Figure 29). Parmi les plans connus, le plan de Chéreau, à la fin XVI^e siècle, a cependant été écarté, car jugé trop approximatif et n'illustrant que les agencements extérieurs sans représentation franche des percements. Seuls les plans du rez-de-chaussée et de l'étage d'entresols lorsqu'ils existent ont été présentés. En effet, il n'existe pas de plan de l'entresol pour les périodes les plus anciennes, puisque la tour n'était pas achevée à ces dates. Les plans de l'étage mansardé ont été écartés car ils ne nous intéressent pas dans le cas présent.

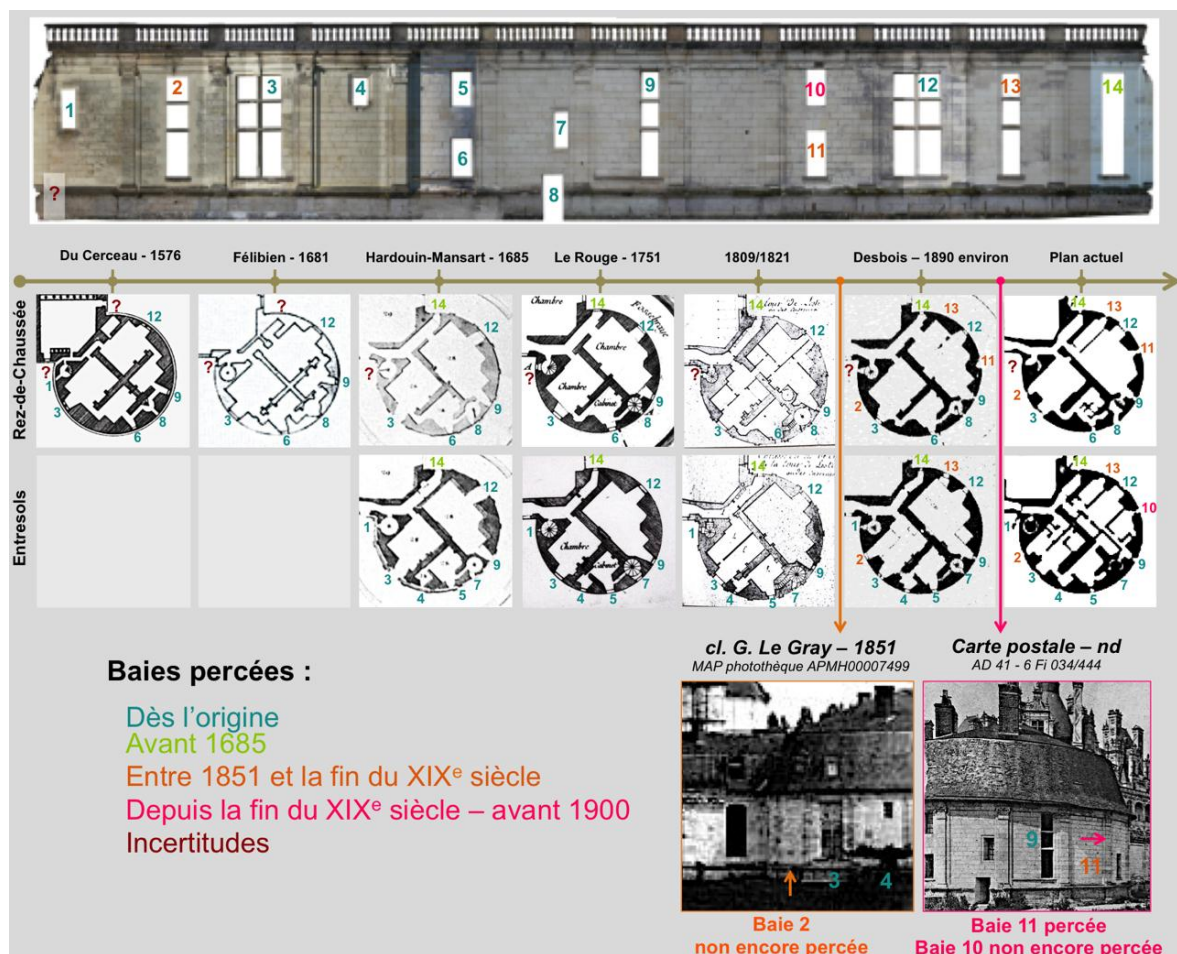


FIGURE 29 : HYPOTHESE DE CHRONOLOGIE DE PERCEMENT DES BAIES DE LA TOUR DU CHAUDRON

Concernant les fenêtres d'origine, notées en bleu sur la Figure 29, il semblerait que les larges baies n°3 et n°12 aient toujours été présentes, avec ce même format, la croisée en pierre étant souvent indiquée sur les plans.

Il en est de même pour la petite baie n°4 à l'étage, mais on peut observer qu'elle a été légèrement agrandie vers le bas, entraînant la disparition de la moulure de l'appui de la fenêtre.

On peut aussi affirmer que la porte n°8 donnant sur l'escalier a toujours existé, de même que la fenêtre n°7 qui lui est superposée, taillée en biais dans la paroi, et qui éclaire l'escalier. La fenêtre n°1 a le même rôle que la fenêtre n°7, et également la même morphologie. Si son dessin apparaît parfois sur le plan du rez-de-chaussée plutôt que sur celui de l'entresol, on peut quand même penser qu'elle a toujours existé et eu la même fonction. On s'interroge en revanche sur le dessin d'une ouverture qui est systématiquement figurée sous cette première baie, au niveau de l'escalier. Il est tentant d'imaginer une porte ouvrant sur la cage d'escalier, comme c'est le cas pour la porte n°8. De plus, sur le plan de Le Rouge en 1751 (Figure 29), celui-ci fait figurer la lettre « A » face à la porte n°8 et cette même lettre apparaît face à cette baie hypothétique. Cependant, les traces archéologiques conservées sur la façade sont ténues et ne permettent pas d'affirmer la présence d'une porte à cet endroit.

Enfin, les plans nous montrent que la baie n°9 est vraisemblablement d'origine. Elle a cependant une disposition curieuse visible à la Figure 30. Elle est étroite, et pourtant un appui de fenêtre de la même largeur que celui de la baie n°3 a été construit dès l'origine puisqu'il possède des signes lapidaires gravés. Peut-être qu'une fenêtre plus large avait été prévue, mais il semble que la disposition intérieure des pièces ne le permettait pas. Comme aucun indice sur les parements ne semble indiquer une ouverture plus large murée ensuite, et que sur les plans, la largeur de la baie est systématiquement dessinée plus étroite que la baie n°3, on peut penser qu'elle a toujours été aussi étroite. Ces mêmes observations sont sans doute valables pour les baies superposées et d'origine n°5 et n°6, dont l'appui de la baie inférieure s'étend sur toute la largeur de la travée alors que les baies sont disposées dans la partie droite. On peut toutefois se demander si les baies n°5 et n°6 étaient à l'origine séparées, ou bien si elles étaient prévues pour être une seule et unique baie. Il semblerait qu'elles aient toujours été séparées. D'une part parce que le linteau au-dessus de la baie inférieure porte des signes lapidaires datés du XVI^e siècle, ce qui indique que les pierres entre les deux baies sont d'origine, d'autre part parce qu'un détail est à noter pour les baies n°6 et n°9 : au niveau des huitième et neuvième assises au-dessus du stylobate, une pierre différente des autres se dessine à droite et à gauche de chaque baie. Ces pierres sont d'une hauteur de deux assises, avec un découpage irrégulier. Pour la baie n°6, ces deux pierres se situent de part et d'autre du linteau de la baie. On peut donc imaginer que ce n'était pas les baies n°5 et n°6 qui étaient

destinées à n'en former qu'une seule, mais plutôt la baie n°9 qui était prévue pour être divisée en deux. Cependant, rien ne permet de savoir si cette division a réellement existé ou non, les gravures et photographies anciennes ne montrant que rarement cette travée, ce qui rend les pierres des meneaux de la fenêtre n°9 difficiles à dater.

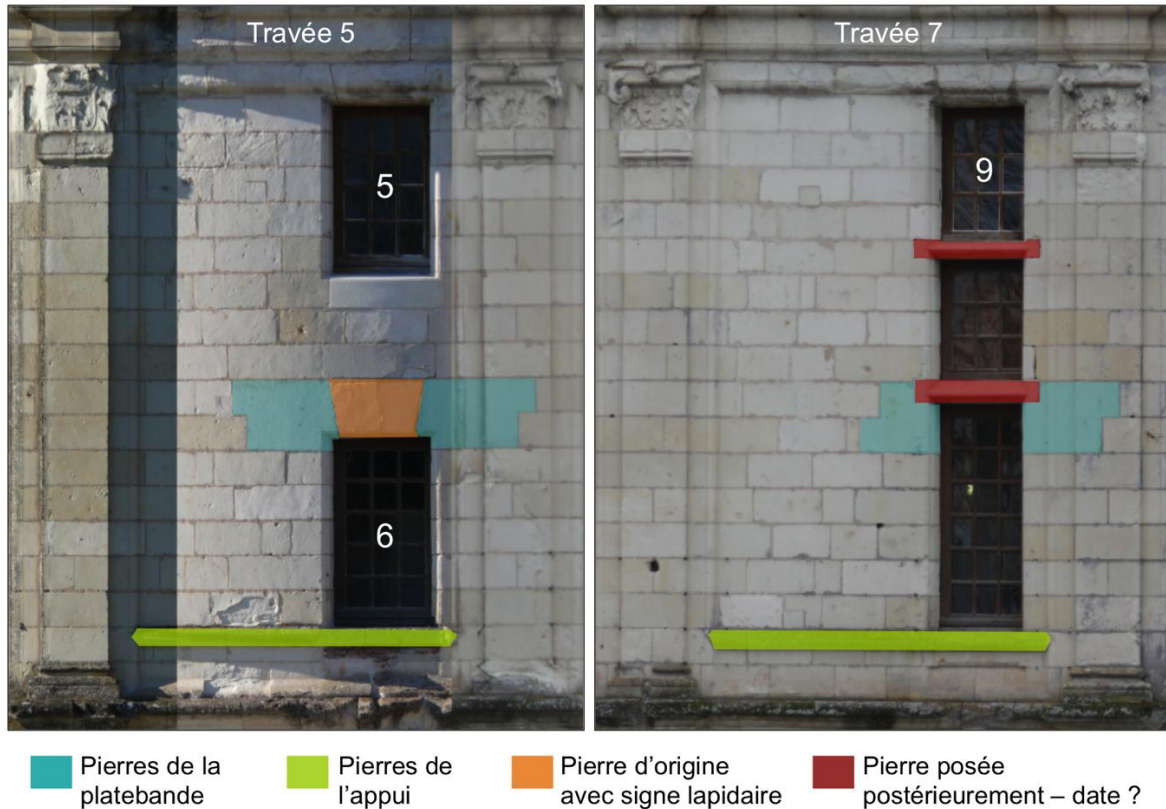


FIGURE 30 : MORPHOLOGIE DES FENÊTRES 5, 6 ET 9

Pour finir avec les fenêtres d'origine, on peut s'interroger sur la baie n°14. Son ouverture n'est clairement indiquée qu'à partir du plan de Jules-Hardouin Mansart en 1685 (Figure 29). Cependant, sur les deux plans précédents, une pièce est figurée à cet endroit de la tour. L'ouverture sur l'extérieur n'est pas franche au niveau du dessin comme elle peut l'être pour les autres baies (notamment pour le plan de Félibien), mais il est très peu probable qu'une pièce ait existé sans qu'aucune ouverture ne l'éclaire. Cette fenêtre semble donc être d'origine, mais il serait plus prudent de dire qu'elle a été percée avant 1685.

La Figure 29 montre qu'avant la fin du XX^e siècle, il n'y a pas eu de nouveaux percements de fenêtres. Ce n'est que lorsque la tour du Chaudron devient habitée et que différents appartements sont créés que de nouvelles fenêtres ont dû être percées. Il n'est pas toujours possible d'en déduire la date exacte, au mieux une période, l'existence de photographies aidant toutefois un peu plus que pour les périodes les plus anciennes.

Lors de la réfection d'une des grandes salles du rez-de-chaussée, les murs ont été décrépés et ont révélé une organisation des parements un peu particulière au niveau de la baie n°2. En effet, les fenêtres d'origine de la tour possèdent un ébrasement entièrement composé de pierre de taille sur toute l'épaisseur du mur, épaisseur qui varie d'un endroit à l'autre de la tour (de 80 à 150 cm). Pour la baie n°2, cet ébrasement est composé de pierre de taille au niveau du parement extérieur et du parement intérieur, et d'une partie centrale constituée de blocages de moellons et de mortiers. Cette différence est bien illustrée par la Figure 31. Cette observation confirme l'analyse des archives concernant le percement de certaines fenêtres.

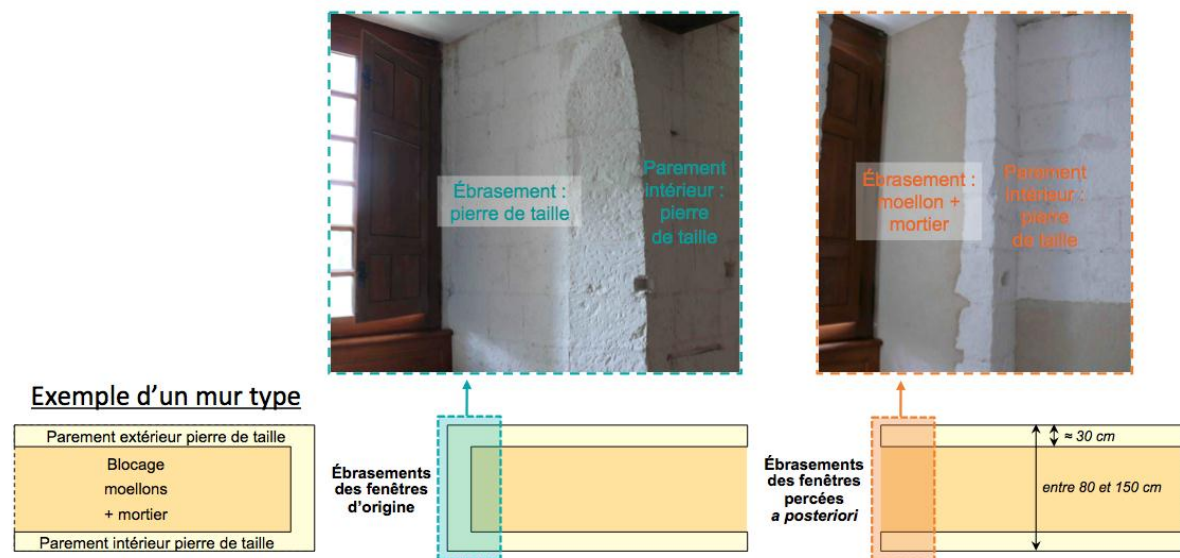


FIGURE 31 : ILLUSTRATION DU PERCEMENT DE LA BAIE N°2, POSTERIEUR A LA CONSTRUCTION DES MURS DE LA TOUR DU CHAUDRON

À en croire les plans successifs, c'est en réaménageant la distribution intérieure de la tour, en divisant les grandes salles en deux, qu'il a été nécessaire d'ouvrir deux nouvelles baies (n°2 et n°13), qui ont été positionnées dans le prolongement des toutes petites baies de l'étage mansardé (Figure 29). Il n'est malheureusement pas possible d'observer l'ébrasement de la fenêtre n°13 de la tour et de confirmer qu'il est semblable à celui de la fenêtre n°2, puisque la majeure partie des parements intérieurs de la tour est recouverte d'un enduit. Ces modifications ont eu lieu entre 1851 et 1890. En effet, une photographie de 1851 montre la deuxième travée non encore percée, et si l'on observe bien la photographie de la Figure 23 présentée précédemment, malgré sa moindre précision, cette baie n'était pas encore percée en 1856 non plus. Ces indices permettent de rétrécir la fourchette chronologique de percement des baies à 1856-1890. Les plans montrent une ouverture franche des parements au niveau de l'étage, mais moins certaine au rez-de-chaussée. L'étage aurait-il été percé avant le rez-de-chaussée ? Il est probable que non, le percement aurait eu lieu en une seule fois, comme

semble l'indiquer un mémoire de travaux réalisés en 1864 sur la tour du Chaudron⁸⁴. Ce document mentionne en effet le percement de deux baies de 4,65 m de hauteur dans les gros murs de la tour. Il s'agit sans aucun doute des baies n°2 et n°13 puisqu'il est indiqué que l'une donne sur la place d'arme, l'autre à l'opposé (et désignée comme étant le fournil). Une troisième fenêtre est percée durant cette campagne de travaux. Il s'agit de la fenêtre de la cuisine, au rez-de-chaussée, faisant 2,40 m de hauteur. Sans indications sur l'emplacement de la cuisine, il est fort possible qu'il s'agisse de la baie n°11, même si elle n'apparaît pas sur le plan de 1890, comme pour les deux autres n°2 et n°13. On en vient à se demander si le plan du rez-de-chaussée à cette date est réellement fidèle à la réalité.

Enfin, la baie n°10 ne sera percée que bien plus tard, comme l'atteste une photographie prise probablement au tout début du XX^e siècle (Figure 29), montrant la neuvième travée, avec la fenêtre n°11 au rez-de-chaussée alors que la fenêtre n°10 n'est pas encore percée. Malheureusement, aucun texte ne contient la mention du percement de cette dernière fenêtre. Comme aucune restauration n'a été entreprise sur cette tour entre 1864 et 1937, date à laquelle les mansardes ont été enlevées, on imagine que c'est autour de 1937 que la baie est ajoutée, car l'on sait qu'après cette date elle existait et qu'il était prévu de faire de nouveaux aménagements dans cette tour en même temps que les mansardes seraient démolies⁸⁵. Pour le percement de cette fenêtre, de nouveaux trous de boulins ont été faits et sont visibles sur la façade, rebouchés, non alignés avec les trous de boulins datant du XVI^e siècle.

2.2.2. RESTAURATIONS DES PAREMENTS

La principale modification qu'a subie cette tour depuis la dernière phase de construction du château au milieu du XVI^e siècle a été, comme pour l'aile Sud, sa surélévation d'un étage mansardé entre 1681 et 1685. Pour les autres ailes du château recouvertes de mansardes, leur construction a entraîné la section de la corniche et des modillons au droit des fenêtres qui avaient été agrandies. Sur la tour du Chaudron, l'absence de corniche moulurée et de modillon n'a donc entraîné aucune modification de ce type. Les mansardes, pourtant probablement provisoires au départ, ont été conservées jusque dans les années 1930, et de nombreux clichés photographiques montrent cet état du monument.

⁸⁴ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 6 Travaux, 1864

⁸⁵ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/06, 1935

Entre l'établissement des mansardes et le milieu du XIX^e siècle, aucune restauration n'est mentionnée. Le percement des trois baies n^{os} 2, 11 et 13 en 1864, évoqué précédemment, a entraîné des remaniements de pierres des parements extérieurs. Il est précisé dans le mémoire des travaux⁸⁶ que les pierres anciennes sont retaillées au niveau des jambages des fenêtres nouvellement percées, sans qu'aucune pierre ne soit remplacée. L'agencement des pierres de la travée semble en effet ne pas avoir subi de changement, aucune pierre encadrant les baies n^o10 et n^o11 ne semble avoir été ajoutée, si ce n'est les platebandes au-dessus et l'appui de chaque baie, qui sont indiquées précisément dans les mémoires et ont été remplacés en pierre de Belleruche. Les meneaux de ces mêmes baies ont été remplacés en pierres de la « carrière des Brosses », autre nom pour désigner la pierre de Bois-Minhy. Trois autres baies préexistantes sont concernées par des reprises de pierres : l'appui, la platebande et les meneaux de la fenêtre de la chambre donnant sur la place d'arme et de celle de la salle à manger, ont été remplacés. Il s'agit probablement des fenêtres n^o3 et n^o12, la longueur de pierre remplacée étant de 2,33 m contre 1,22 m pour les fenêtres n^o2 et n^o13. Pour la baie n^o3, il est précisé que quatre pierres ont été remplacées sur les jambages de la baie, sans préciser la localisation des assises concernées, à partir de pierres remployées. Ce sont donc des remplacements, mais fait en tuffeau d'origine. La fenêtre n^o14 a également reçu des meneaux semblables aux fenêtres n^o2 et n^o13, mais ceux-ci ont depuis été démontés.

On note, en 1886 des travaux de réparation de la baie du cabinet donnant sur la place d'arme. Le soubassement de la baie doit être détruit et reconstruit en briques. Le plan de Le Rouge en 1751 (Figure 29) indique qu'une pièce du rez-de-chaussée est un cabinet de travail, dont la baie ouvre sur la cinquième travée. On peut donc penser qu'il s'agit de la baie n^o6 dont l'allège est aujourd'hui en très mauvais état et laisse apparaître des briques⁸⁷.

Par la suite, au XX^e siècle, les mansardes de la tour du Chaudron ont été démolies à partir de 1937, dans la continuité de l'aile Sud. La Figure 32 illustre ces différents états de la tour, à travers des gravures et des photographies. Une note indique qu'en cours de travaux, une tempête a couché sur la tour du Chaudron un des monte-charges utilisés pour la démolition des mansardes. Des dégâts sont mentionnés, qui ont apparemment pu être réparés, sans plus de précisions quant à la nature et la localisation de ces dégâts⁸⁸. L'entablement de la tour était en très mauvais état, et il a fallu le restaurer en pierre de Salamandre⁸⁹. Des modillons et

⁸⁶ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 6 Travaux, 1864

⁸⁷ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds 37 Q 9 Travaux, 1886

⁸⁸ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du P. Robert-Houdin à l'entreprise Degaine le 6 décembre 1938

⁸⁹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, rapport de Maurice Lotte, 1938

coquilles devaient être sculptés sur la corniche pour inscrire la tour dans la continuité stylistique de l'aile Sud, bien que cette corniche sculptée n'ait jamais existé sur cette tour (qui devait à l'origine être élevée sur plusieurs niveaux à l'instar des tours du donjon). La corniche sculptée a été prévue dans un rapport de 1938 qui ne revêtait cependant pas un caractère urgent⁹⁰ : ces sculptures n'ont finalement jamais été réalisées. Les terrasses surmontant la tour ont été construites en béton à partir de 1937 par l'entreprise Degaine et les socles des balustrades ont été posés en 1939, en pierre de Lavoux⁹¹. Si les devis sont extrêmement précis à cette période concernant l'aile Sud, avec l'apport de plans et dessins, les renseignements concernant les remplacements des parties supérieures des parements sur la tour du Chaudron sont très lacunaires, c'est le faciès des pierres (neuves et en calcaire plus dur que le tuffeau) qui nous renseigne sur la localisation des pierres remplacées.

En 1978, l'étanchéité de ces terrasses n'était plus assurée. Ce phénomène est décrit comme étant la conséquence de mouvements de sols dus à la grande sécheresse de l'été 1976. Ce sont essentiellement la partie de droite de l'aile Sud et surtout la tour du Chaudron qui ont été touchées, le terrain étant plus marneux à cet endroit, donc plus sujet aux mouvements. Il a donc fallu entreprendre des travaux d'étanchéité des terrasses au niveau des couvre-joints à l'intersection pierre-béton⁹². Les désordres occasionnés au niveau des maçonneries de la tour ne sont pas mentionnés mais ils existent probablement et ont contribué à son délabrement. Enfin, les balustrades, en pierre de Richemont, ne sont installées sur la tour du Chaudron par l'entreprise Lefèvre qu'à partir de 1980⁹³, plus de 25 ans après celles de l'aile Sud.

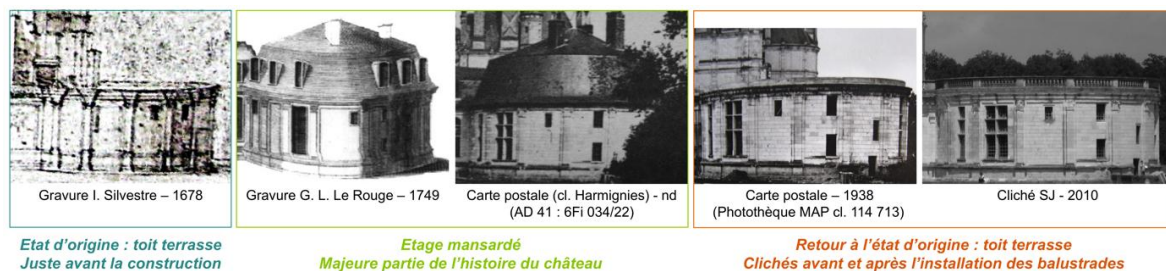


FIGURE 32 : LES MANSARDES ET LES TOITS TERRASSES DE LA TOUR DU CHAUDRON

⁹⁰ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/07, devis de travaux, Maurice Lotte

⁹¹ Archives Départementales du Loir-et-Cher, Blois (41), Fonds Robert-Houdin, 127 J 41, 1939

⁹² Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571, devis du 20 novembre 1979 et mémoire d'exécution des travaux de septembre 1981

⁹³ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571, mémoire des travaux effectués de février 1980 à mai 1981

Dans la continuité de l'installation des balustrades, des réparations urgentes des parements, en pierre de Villentrois, sont également mentionnées, réalisées en 1980-81⁹⁴. Malheureusement, aucune illustration ou explication plus précise n'accompagne le devis, nous ne savons donc pas exactement où se situent ces remplacements. Peut-être s'agit-il de la platebande de la fenêtre n°3 et des deux travées contiguës à l'aile des communs d'Orléans (aile restaurée à ces mêmes dates), dont une partie des pierres semble avoir été remplacée en tuffeau et dont aucune trace ne subsiste dans les textes.

De plus, à partir de 1983-1985, de gros travaux de réaménagement intérieur de la tour ont été faits, pour transformer le rez-de-chaussée en pièces polyvalentes et de travail, et l'entresol en deux appartements pour loger le personnel⁹⁵. Ainsi, en 1986, l'appui de la baie n°5 a aussi été refait en tuffeau de Villentrois⁹⁶.

En 1994 débute un programme de restauration des maçonneries extérieures de la tour du Chaudron. C'est la deuxième travée en partant de l'angle avec l'aile Sud qui fait l'objet de restauration. La pierre de Pontijou est utilisée pour la première assise du soubassement à remplacer en partie. La localisation exacte des pierres remplacées sur la tour n'est pas mentionnée et il est difficile de voir la différence entre les pierres anciennes et neuves, pour les soubassements. Les parties endommagées du parement sont remplacées par du tuffeau de Villentrois neuf. En effet, il est clairement visible que les jambages, la platebande, l'allège de la baie n°2, et le stylobate de cette travée ont été remplacés. Sur les parties conservées, un rejointoiement de chaux grasse (c'est-à-dire avec peu de sable) est fait par précaution⁹⁷. Il convient de noter que c'est précisément l'encadrement de cette baie-là, percée postérieurement aux autres, au XIX^e siècle, qui a été entièrement refait.

En 1999, le Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine fait un rapport de visite de chantier dans lequel est prévue la « reprise du bandeau de soubassement sur la tour du Chaudron », dans la continuité des travaux précédents. C'est la première travée en partant de l'angle de l'aile Sud qui est concernée. En effet, le stylobate de cette tour est dans un état très délabré. La pierre du soubassement est une pierre très dure. Celle du parement du mur, du tuffeau, est très tendre. C'est donc de la pierre de Richemont qui a été employée pour le stylobate saillant, d'une dureté moyenne, et qui a donc assuré la transition. Les assises altérées situées directement au-dessus du stylobate restauré ont été remplacées par des pierres de

⁹⁴ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571, devis du 18 décembre 1977, du 15 mai 1979 et du 17 septembre 1980

⁹⁵ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571 et 1339 W 572

⁹⁶ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 572

⁹⁷ DRAC – CRMH, documents Chambord T5, devis de l'entreprise Lefèvre en 1994

tuffeau de Villentrois. Il est également précisé que toutes les traces archéologiques (trous de boulins) que comportaient les pierres à remplacer ont été scrupuleusement reproduites. Enfin, une patine artificielle a été appliquée pour "vieillir" les pierres neuves⁹⁸. La Figure 33 montre la première travée de la tour avant sa restauration de 1999, avec un stylobate très abîmé sur l'ensemble de la travée, à l'exception des pierres contiguës à l'aile Sud, déjà remplacées lors des restaurations de l'aile Sud en 1964⁹⁹. Il semblerait que ces restaurations se sont légèrement prolongées sur le stylobate de la tour, au niveau des premiers parements de gauche de la première travée. Les pierres restaurées sur la partie droite de cette même photographie datent des remplacements de 1994 sur la deuxième travée.

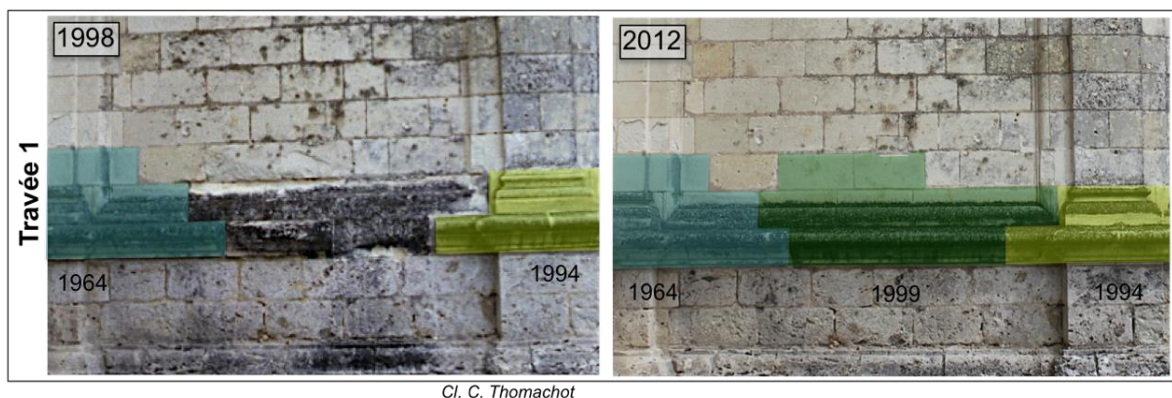


FIGURE 33 : DATES DES DIFFÉRENTES REPRISES DES PAREMENTS DE LA TOUR DU CHAUDRON SUR LA TRAVÉE CONTIGÜE À L'AILE SUD

Seules les travées n°1 et n°2 sont concernées par les devis et mémoires conservés aux archives. Or on remarque que les quatre premières travées en partant de l'aile Sud présentent un stylobate de pierre saine. L'état avant restauration des travées n°3 et n°4 est visible sur des clichés pris en mai 1998 (Thomachot, 1998), ce qui indique que la restauration de ces deux travées restantes date d'après 1998, probablement dans la continuité des travaux de 1999. Dans ces devis, il est mentionné qu'il était prévu que l'ensemble de la tour du Chaudron soit restauré, au moins au niveau du stylobate. Les travaux semblent être cependant arrêtés, seules les travées visibles par le public ont été restaurées (Figure 34).

⁹⁸ DRAC – CRMH, documents Chambord T10, devis de l'entreprise Lefèvre en 1999 - rapport de Philippe Andrieu en 1999, Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine

⁹⁹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/26, devis du 24 Décembre 1964

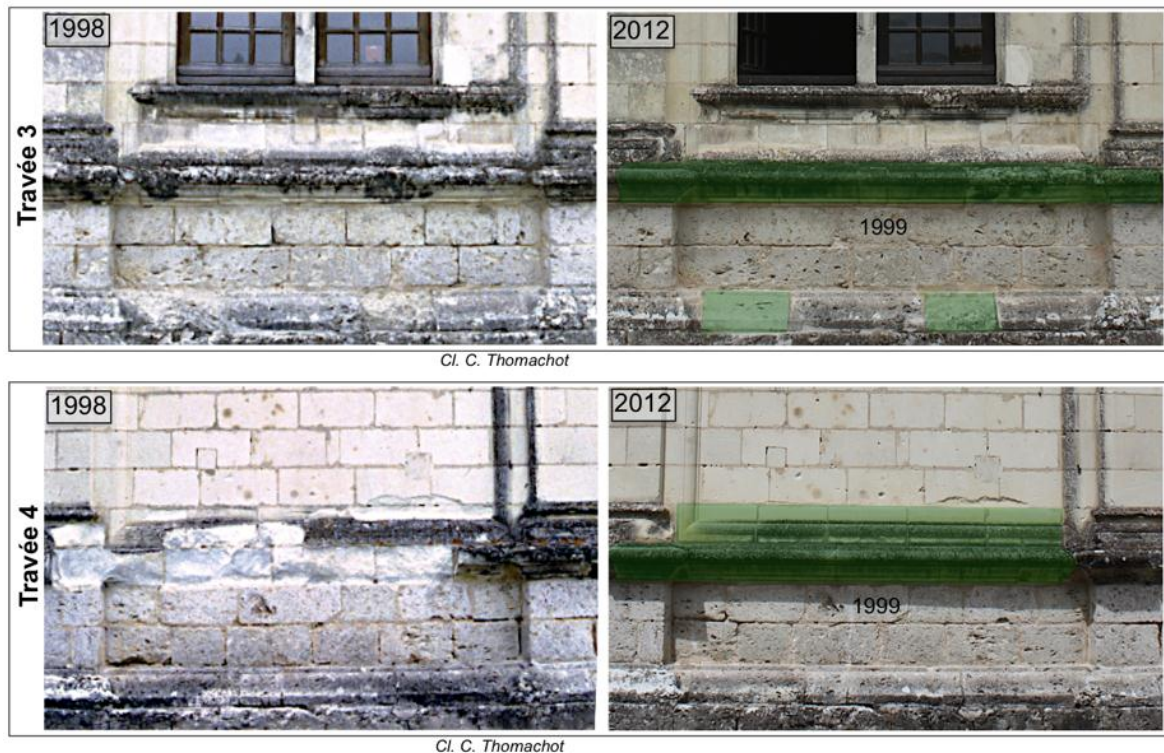
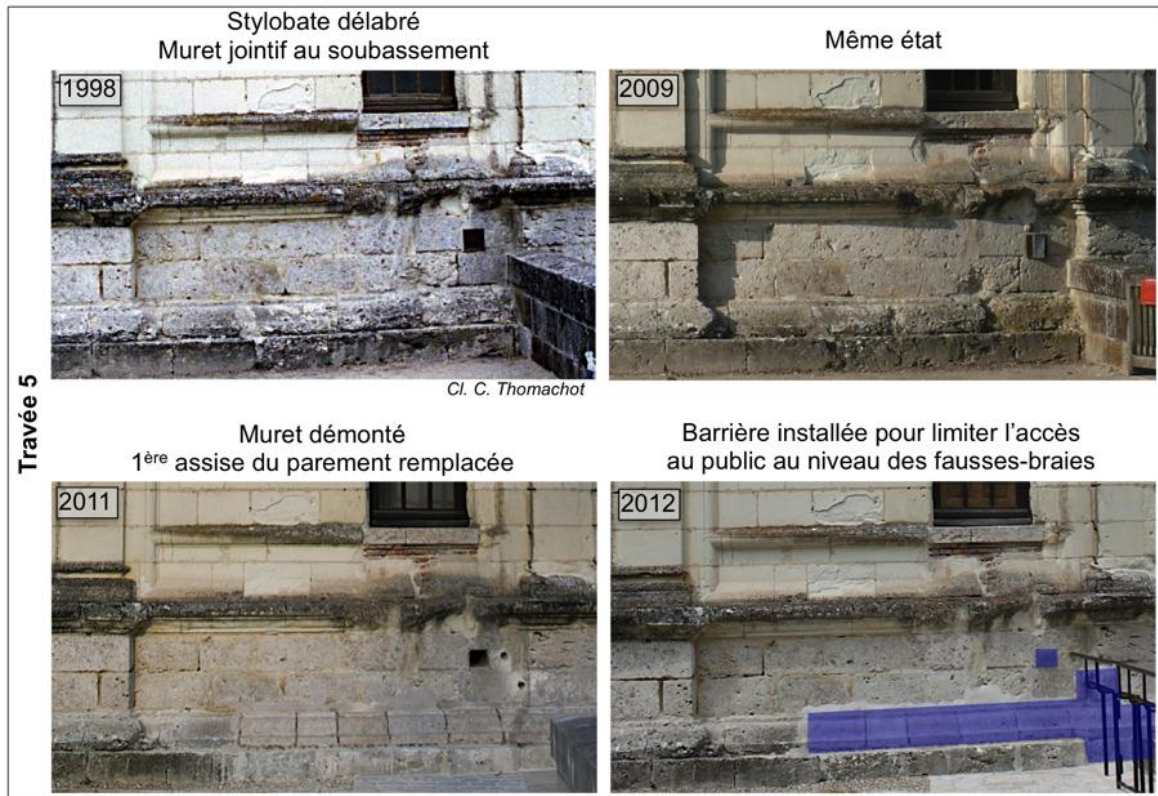


FIGURE 34 : STYLOBATE DES 3^E ET 4^E TRAVEES DE LA TOUR DU CHAUDRON AVANT ET APRES LA RESTAURATION DE 1999

Enfin, une restauration de 2011 aux abords de la tour du Chaudron, a conduit à remplacer, entre la travée n°5 et la travée n°6, le muret et la barrière qui interdisaient l'accès au public aux autres travées de la tour, par une barrière légère en métal. La destruction du muret a nécessité la reprise des blocs de calcaire lacustre de la première assise du soubassement de la cinquième travée, rejointoyés très largement avec un mortier clair, comme on peut le voir sur la Figure 35. C'est du calcaire de Pontlevoy qui a été utilisé, comme pour la reprise de la pierre au niveau du jambage de droite du Portail Royal. En revanche, cette travée est la dernière accessible au public, et la seule dont le stylobate, très délabré, n'a jamais été remplacé. On imagine aisément que si une restauration est prévue prochainement, ce sera cette travée qui sera remplacée en priorité.

FIGURE 35 : SOUBASSEMENT DE LA 5^E TRAVÉE DE LA TOUR, AVANT ET APRES RESTAURATION

3. ANALYSE GRAPHIQUE ET STATISTIQUE DES PIERRES EMPLOYÉES ET DISCUSSION

Si certaines parties restaurées peuvent être localisées avec précision ou par déduction, pour d'autres, leur localisation, leur date ou leur provenance restent imprécises, et nous ne pouvons faire que des suppositions. Il faut alors se référer aux descriptions que l'on trouve dans les textes, aux schémas et dessins accompagnant les devis et mémoires, aux photographies anciennes et aux différents faciès de pierres que l'on peut observer en façade.

À partir des données de datation et de matériaux employés déduites et exposées dans la partie précédente, il est possible de produire différentes cartographies de façades dont les informations sont à l'échelle de la pierre :

- des cartographies de données historiques
- des cartographies de données géologiques

Les informations peuvent être observées graphiquement, au niveau de leur répartition dans l'espace, mais peuvent également être quantifiées et comparées.

3.1. CRITIQUE D'AUTHENTICITÉ

La critique d'authenticité, exercice habituellement appliqué aux sources documentaires recueillies lors d'une étude historique, peut être transposée ici, appliquée aux pierres des façades. On cherche à identifier les pierres d'origine, en opposition avec celles qui ont été remplacées. C'est la cartographie pierre à pierre des façades qui permet ici d'illustrer ces remplacements. Nous ne sommes réellement certains de la date de pose des pierres que pour celles qui présentent des signes lapidaires, caractéristiques du XVI^e siècle. En dehors de ces pierres-ci, les datations proposées sont des hypothèses plus ou moins sûres. Les pierres portant des signes lapidaires ont donc été répertoriées et présentées ici sans distinction de signe. L'ensemble des pierres présentant un faciès neuf a ensuite été relevé, puis corrélé à l'analyse des archives précédemment faite. Le degré de certitude est parfois mentionné sur les cartographies lorsque les différentes sources croisées ne sont pas suffisantes et que le doute perdure.

Que ce soit pour l'aile Sud ou la tour du Chaudron, les cartographies de la Figure 36 et de la Figure 37 permettent de constater que ce sont essentiellement les parties hautes et les parties les plus saillantes qui ont été remplacées¹⁰⁰. Ceci s'explique par le fait que ce sont les parties les plus altérées du fait de leur relief. Les calcaires lacustres de soubassement, en revanche, ne sont que très peu souvent remplacés, en raison de leur dureté, de leur faible altérabilité, et probablement de leur importance esthétique secondaire ; leur emploi en soubassement du tuffeau étant ainsi pleinement justifié.

Parfois, l'étude des archives a révélé qu'une même zone a pu être restaurée à plusieurs dates successives, comme c'est le cas pour le Portail Royal, par exemple. Entièrement remanié sous Louis XIV, il a également subi d'importants travaux de restauration dans les années 1960, entraînant le remplacement de presque toutes les pierres du portail. Les différentes phases de travaux n'apparaissent donc pas forcément puisque seul l'état final est présenté sur les cartographies. Le pourcentage final des différentes dates de remplacement de pierres n'est donc pas à strictement parler un pourcentage de surfaces remplacées à chaque époque, mais

¹⁰⁰ Pour une meilleure visualisation des données, l'annexe 4.1 présente en format A3 les cartographies de datation des pierres de l'aile Sud et de la tour du Chaudron

plutôt un pourcentage de surfaces de pierres posées à différentes périodes et restant actuellement en place. Des pierres posées sous Louis XIV, il ne reste aujourd'hui qu'une surface de 3,7% de la totalité de la façade, alors que cette proportion devait occuper près du triple avant les restaurations du XX^e siècle. Les pierres de la tour du Chaudron n'ont absolument pas été affectées par les travaux réalisés sous Louis XIV.

Au XVIII^e siècle, que ce soit pour la tour du Chaudron ou pour l'aile Sud, aucune restauration n'a eu d'impact sur les parements extérieurs. Les restaurations effectuées au XIX^e siècle sont légères, et ne concernent que des travaux effectués sur les ouvertures : baies nouvellement percées, agrandies, ou simplement restaurées. Dans le cas de percements ou d'agrandissement de baies, il semblerait que les travaux n'aient eu que peu d'incidence sur la date de pose des parements. Ceux-ci, d'origine, ont donc généralement été retaillés, sans apport de pierres neuves en dehors de claveaux, d'appuis de fenêtre, ou de croisées en pierre. Ces remplacements représentent actuellement moins d'1% de la façade de l'aile Sud, et 2% de celle de la tour du Chaudron. Il faut toutefois noter qu'au moment de ces percements, des surfaces de pierres anciennes ont été nouvellement mises à jour au niveau de l'ébrasement de la fenêtre.

On remarque enfin que c'est au XX^e siècle que le pourcentage de surface de pierres remplacées est le plus important, autour de 48% pour l'aile Sud et de 26% pour la tour du Chaudron. Ces cartographies sont un état final des façades, ce qui expliquerait que l'on trouve un pourcentage plus élevé de pierres remplacées à des périodes récentes. Mais les archives affichent tout de même une tendance forte montrant que c'est au XX^e siècle qu'ont eu lieu les restaurations les plus importantes.

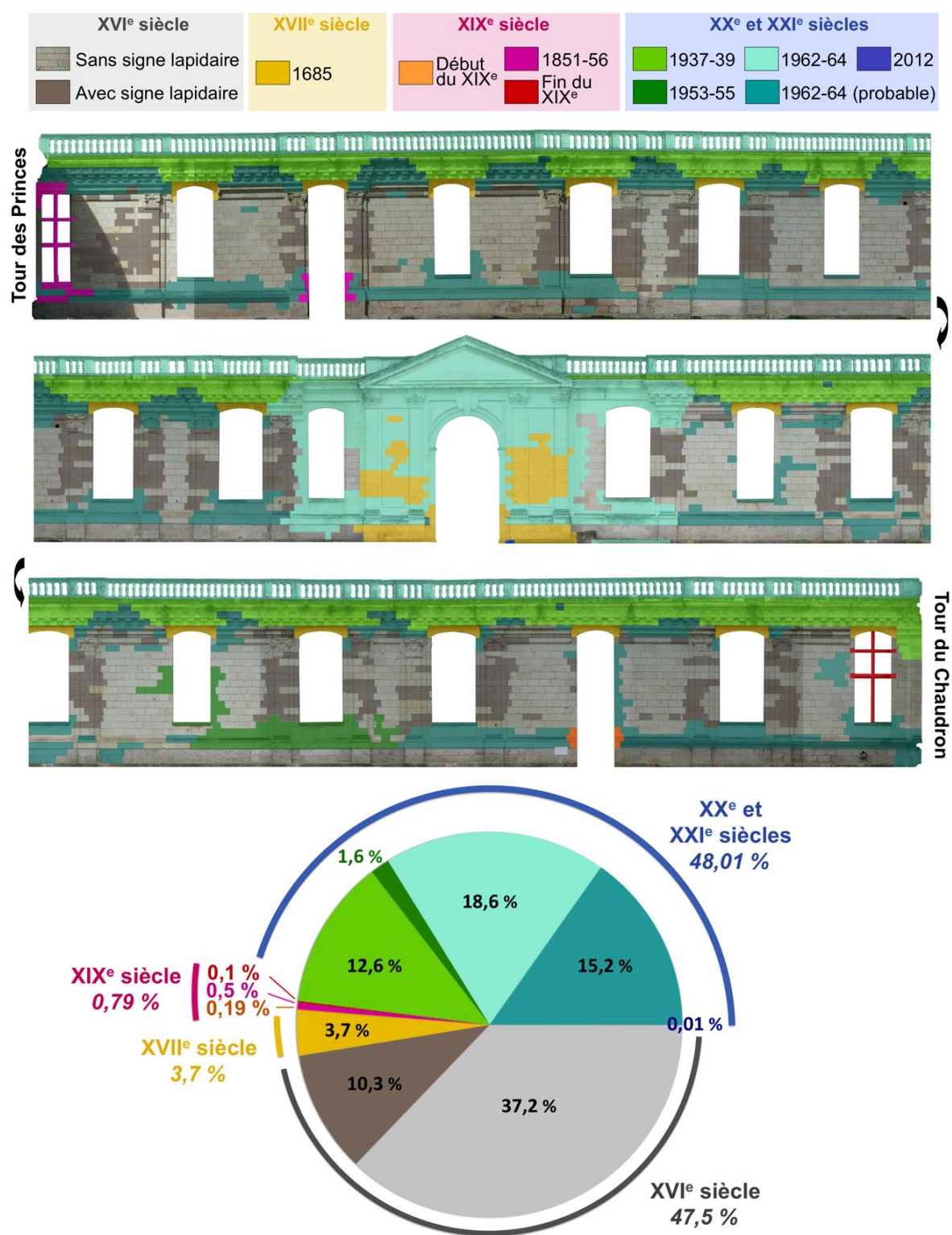


FIGURE 36 : CARTOGRAPHIE DE LA REPARTITION DES DIFFERENTES DATES DE POSE DE PIERRES SUR LA FAÇADE EXTERIEURE DE L'AILLE SUD ET PROPORTIONS DE CHACUNE DE CES DATES

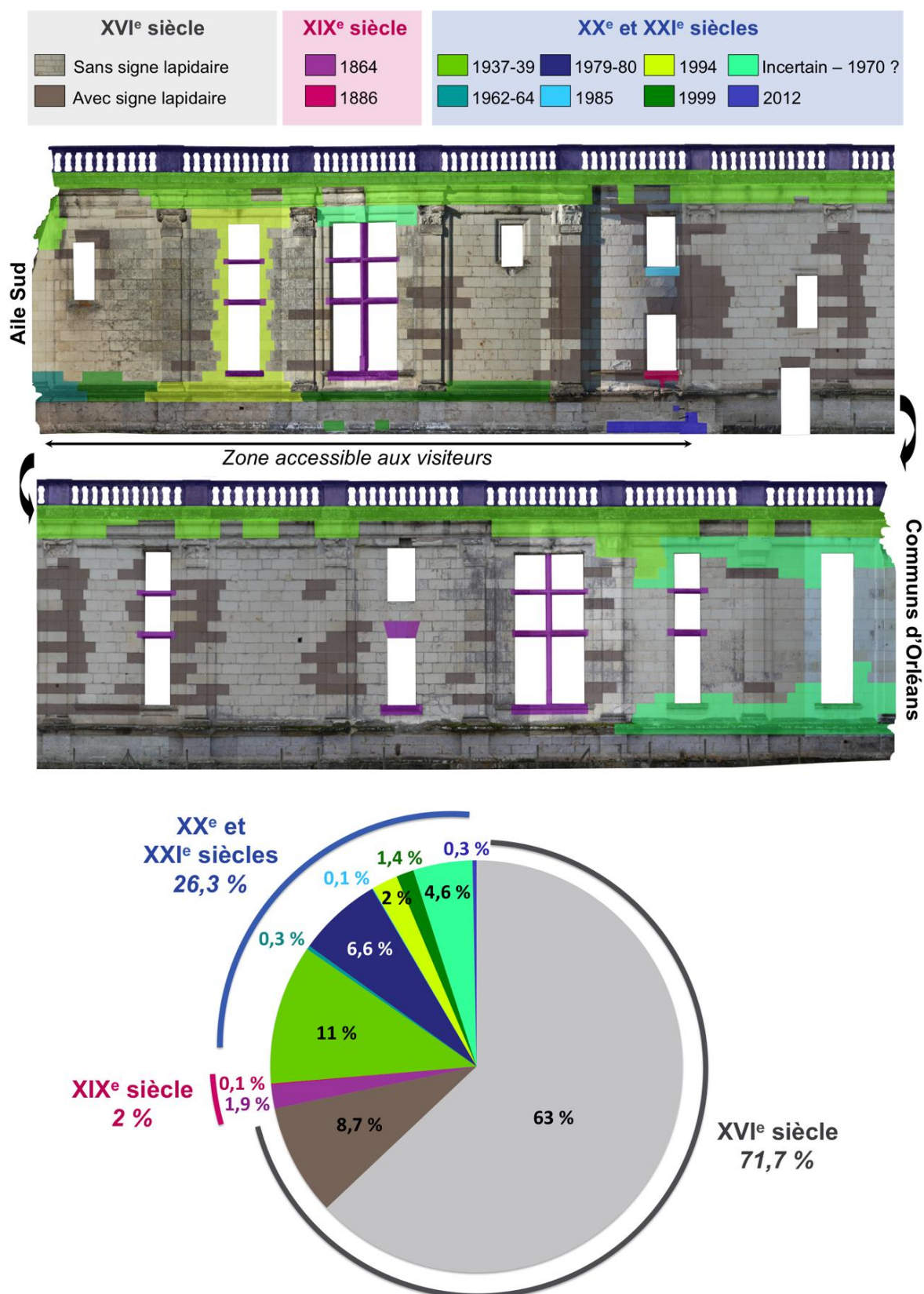


FIGURE 37 : CARTOGRAPHIE DE LA REPARTITION DES DIFFERENTES DATES DE POSE DE PIERRES SUR LA FAÇADE EXTERIEURE DE LA TOUR DU CHAUDRON ET PROPORTION DE CHACUNE DE CES DATES

Même si le calcul du pourcentage de surfaces remplacées aux différentes époques et encore visibles aujourd'hui est intéressant, il conviendrait mieux, par prudence autant que dans le but de synthétiser l'information, de calculer le pourcentage de surfaces de pierres qui sont d'origine par rapport au pourcentage total de surfaces de pierres remplacées au cours des siècles (Figure 38). On constate que 52,5 % de la surface totale des pierres a été remplacée sur l'aile Sud. Cette proportion diffère par rapport à la tour du Chaudron dont 28,3 % des pierres ont été remplacées. La tour du Chaudron possède donc encore plus de 70% de son parement d'origine. Ceci s'explique par le fait que l'aile Sud est davantage exposée au public (notamment par son rôle d'entrée du château), à l'inverse de la tour du Chaudron, plus en retrait et à l'écart de toute circulation du public et qui a donc moins été prioritaire pour les travaux de restauration.

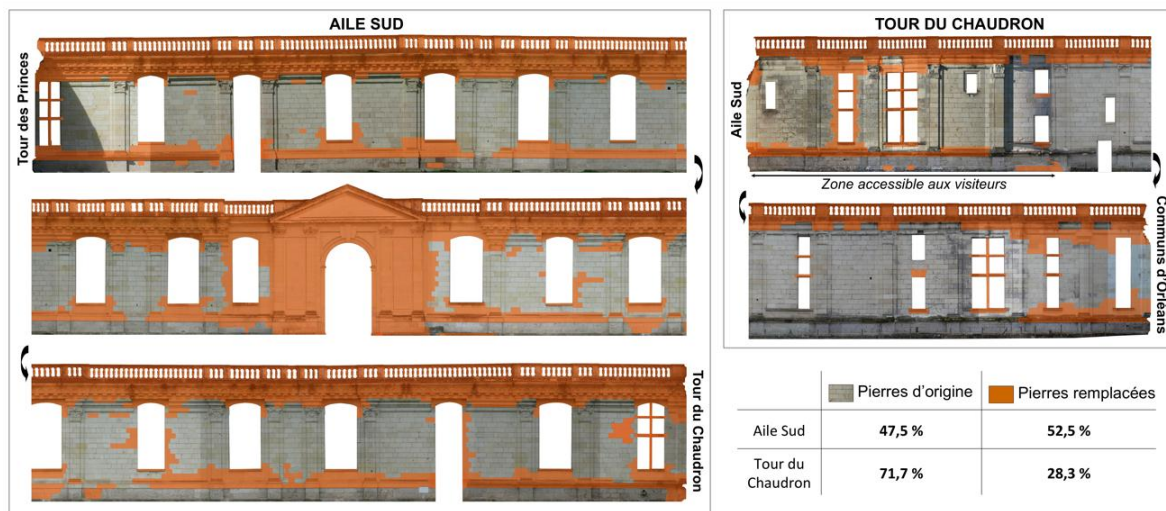


FIGURE 38 : REPRESENTATION ET POURCENTAGE DE SURFACES DE PIERRES REMPLACEES SUR L'AILE SUD ET LA TOUR DU CHAUDRON

3.2. RELEVÉ DES NATURES DE PIERRES

Si les archives renseignent sur les différentes dates de pose de pierres, elles renseignent également parfois sur les matériaux employés, et les carrières exploitées. Sur la base des cartographies de critique d'authenticité, l'étude croisée entre les observations de terrain et les données des archives de construction et de restauration a donc permis d'autres types de cartographies, illustrant la nature et la provenance des pierres des façades.

La cartographie la plus simple et la plus juste est celle représentant la nature des pierres employées pour chacune des façades (Figure 39). Ce sont uniquement des calcaires. Les

soubassements, en calcaires lacustres, représentent environ 12% de la totalité des surfaces des façades, que ce soit pour l'aile Sud ou la tour du Chaudron. Les deux autres natures de pierres, employées en élévations, se répartissent en revanche différemment selon les façades. Il s'agit de pierres de tuffeau et de calcaires poreux moins fins et possédant une résistance mécanique plus élevée que le tuffeau. Sur la tour du Chaudron, on remarque que le centre des travées contient uniquement du tuffeau, alors que les autres calcaires fins n'ont été mis en place que sur les parties hautes et les parties saillantes, plus exposées aux aléas climatiques. Si l'on ne considère que les parements au-dessus des soubassements, la proportion des divers calcaires fins est de 23% environ contre 77% de tuffeau. Cette disposition est bien différente pour l'aile Sud, plus largement restaurée après la seconde guerre mondiale, époque où le calcaire de Richemont est employé systématiquement en remplacement du tuffeau sur l'ensemble des parements, qu'ils soient droits ou en relief. La juxtaposition de ces deux natures de pierres, au sein d'un même parement, soulève d'ailleurs des questions de compatibilité. Le pourcentage de surface de pierres de tuffeau est légèrement inférieur à celui des autres calcaires : 47% de tuffeau contre 53% de calcaires fins, plus de 70% de ces pierres calcaires utilisées en remplacement étant uniquement de la pierre de Richemont.



FIGURE 39 : REPRESENTATION ET POURCENTAGE DES DIFFERENTES NATURES DE PIERRES RECENSEES SUR L'AILE SUD ET SUR LA TOUR DU CHAUDRON

On peut s'aventurer un peu plus en précision en s'intéressant à la provenance des pierres pour chacune des différentes natures listées plus haut, sachant que des incertitudes subsistent. Lorsque les mémoires de réalisation des travaux ont été conservés, ou au moins les devis avec la preuve ou des indices que les travaux ont bien été réalisés, il a été choisi de représenter sur les cartographies les différentes provenances de pierres employées mentionnées dans ces

textes. En revanche, lorsque seules des photographies nous indiquent qu'il y a eu des transformations impliquant des remplacements de pierres, sans qu'aucun devis ou mémoire ne soit associé, il n'est pas possible de savoir quelle pierre a été employée. Même si l'on connaît historiquement les emplois de pierres venant de telle ou telle carrière en fonction des époques (voir partie 1 de ce chapitre), on ne peut faire que des suppositions, et dans ce cas-là, par prudence, la carrière ne sera pas mentionnée sur la cartographie, mais seulement la nature de la pierre et la période chronologique (Figure 40 et Figure 41¹⁰¹).

On sait que les tuffeaux utilisés à l'origine au XVI^e siècle proviennent de six carrières différentes. Sous Louis XIV la provenance et la localisation des pierres n'est pas non plus systématiquement précisée dans les textes. Il n'est donc pas toujours possible de localiser chacune de ces différentes natures de pierres sur la façade pour toutes les périodes. En revanche, les restaurations postérieures, mieux documentées, permettent parfois une identification plus précise de ces pierres. Cependant, aucune pierre de tuffeau employée sur l'aile Sud n'est identifiable, que ce soient les tuffeaux d'origine, ou ceux employés dans les périodes les plus récentes. A l'inverse, sur la tour du Chaudron, on peut plus aisément identifier les provenances des tuffeaux employés à partir du XIX^e siècle. Comment expliquer cette différence d'identification des tuffeaux alors que l'aile Sud a également très souvent été restaurée à partir de cette date ? Pour le XIX^e siècle, les archives relatives aux travaux de la tour du Chaudron ont été conservées, alors que celles relatives aux travaux de l'aile Sud n'ont pas pu être trouvées. Ce sont les photographies qui nous renseignent sur les restaurations effectuées, il n'y a donc pas de mention des matériaux employés. De plus, concernant les travaux du XX^e siècle, ceux-ci sont nombreux, notamment sur l'aile Sud, mais la majorité des pierres employées à cette époque n'est plus du tuffeau, ce sont divers calcaires fins plus durs que le tuffeau, et d'une provenance plus éloignée. L'emploi du tuffeau en restauration ne redevient d'usage que depuis une trentaine d'années. Or la tour du Chaudron a subi des restaurations depuis cette date, alors que les dernières restaurations des parements de l'aile Sud datent de 1964, date à laquelle l'emploi de calcaire autre que le tuffeau était grandement généralisé, notamment celui de la pierre de Richemont. Aucune pierre de tuffeau n'a donc été employée sur l'aile Sud au XX^e siècle.

¹⁰¹ Pour une meilleure visualisation des données, l'annexe 4.2 présente en format A3 les cartographies de provenance des pierres de l'aile Sud et de la tour du Chaudron

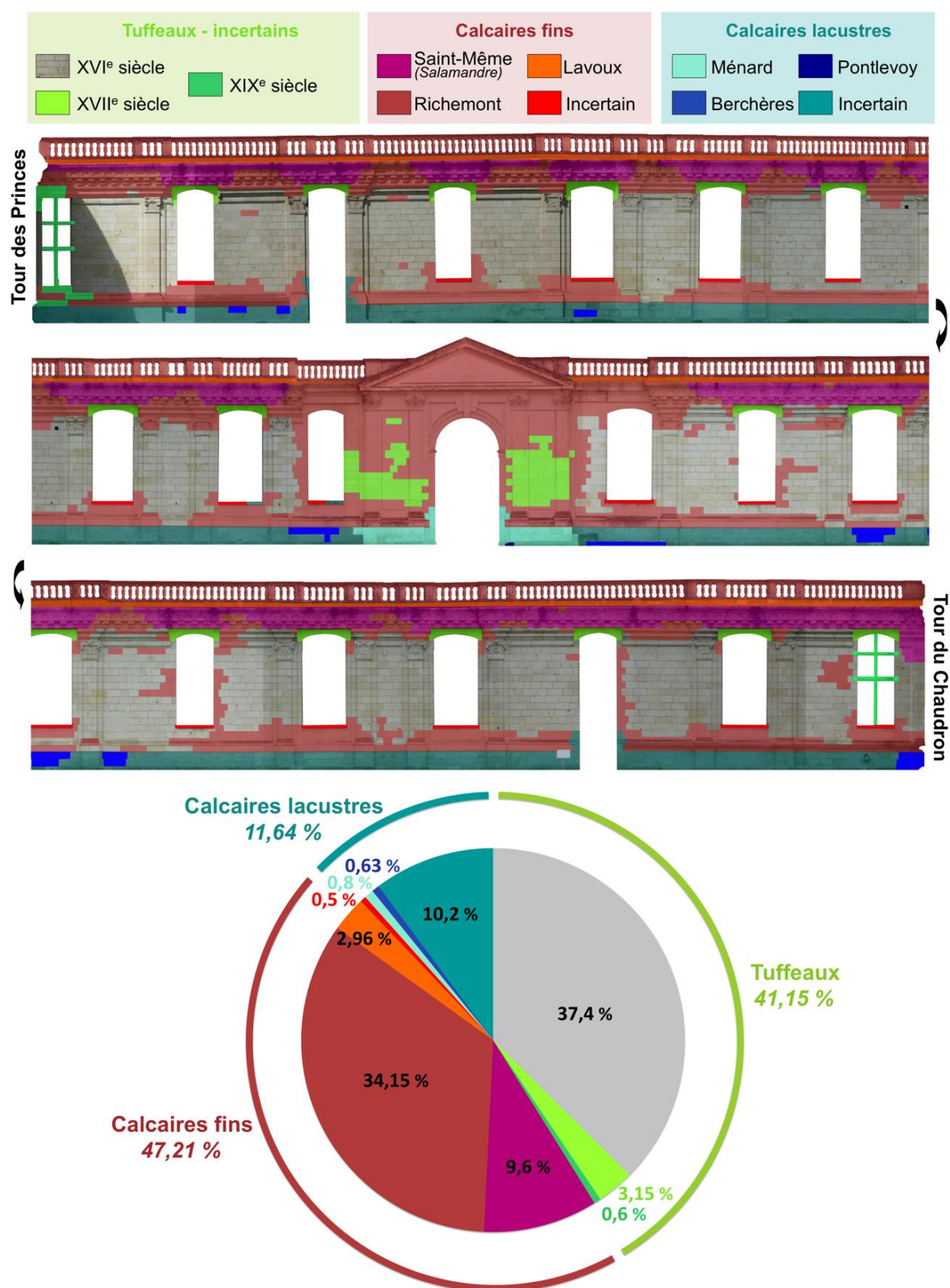


FIGURE 40 : CARTOGRAPHIE DE LA REPARTITION DES DIFFERENTES NATURES DE PIERRES SUR LA FAÇADE EXTERIEURE DE L'AILE SUD ET PROPORTION DE CHACUNE DE CES PROVENANCES

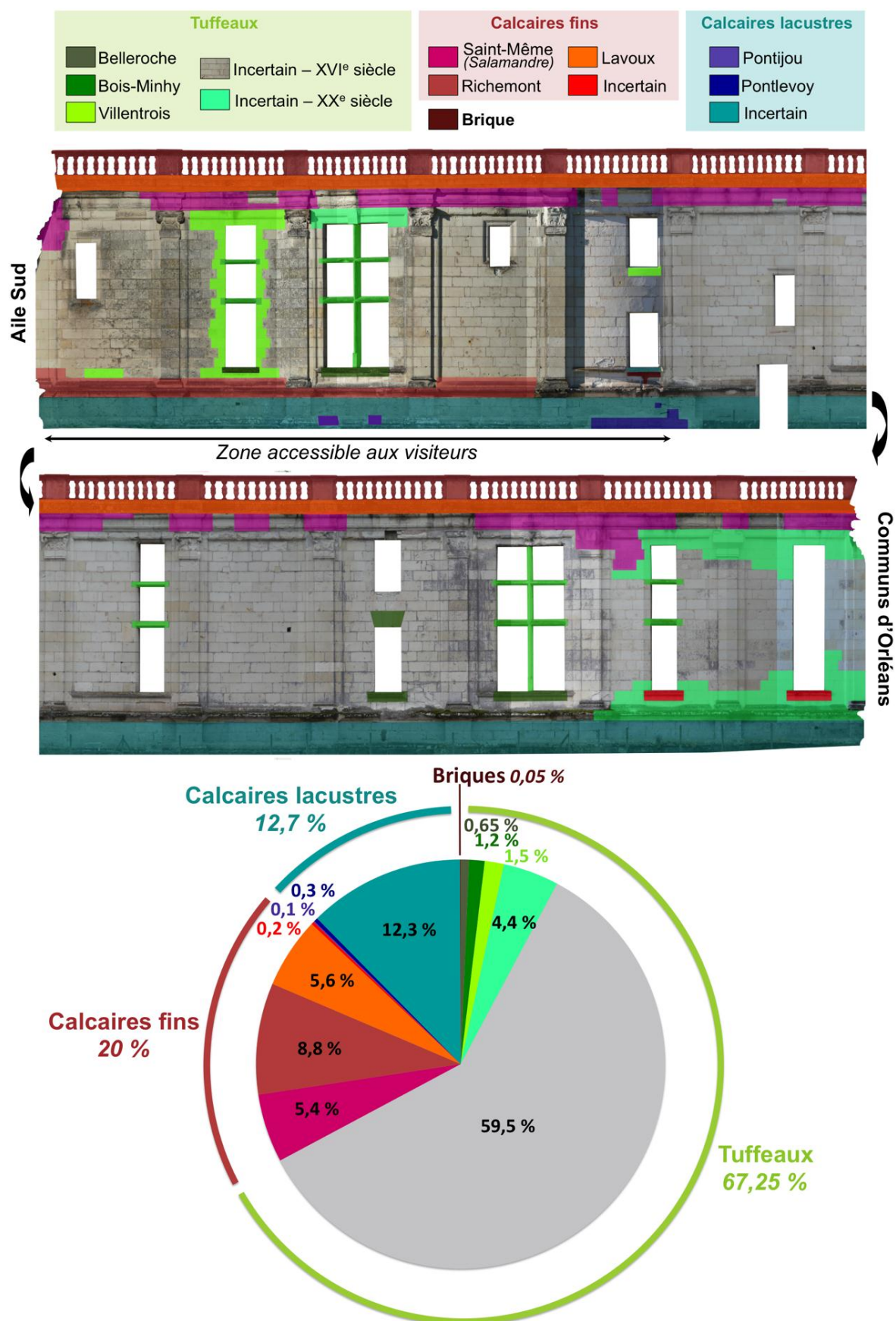


FIGURE 41 : CARTOGRAPHIE DE LA REPARTITION DES DIFFERENTES PROVENANCES DE PIERRES SUR LA FAÇADE EXTERIEURE DE LA TOUR DU CHAUDRON ET PROPORTION DE CHACUNE DE CES PROVENANCES

À ces cartographies pierre à pierre des façades sont associées des cartes géologiques de localisation des différentes carrières exploitées, sur le modèle de celles réalisées pour le château de la première partie de ce chapitre, mais appliquées ici uniquement à l'aile Sud et à la tour du Chaudron. Comme pour les cartographies pierre à pierre où les incertitudes de provenance sont mentionnées, le niveau de certitude sera matérialisé, sur les cartes géologiques, par un signe d'une couleur différente pour localiser la carrière dont le doute est formulé (Figure 42 et Figure 43).

Si l'on compare les cartes de provenance des pierres employées sur l'aile Sud et la tour du Chaudron à celles des pierres employées sur l'ensemble du château, on remarque que les pierres des deux façades forment un ensemble plus restreint et homogène, les pierres employées sur l'aile Sud étant légèrement plus variées que celles de la tour du Chaudron, ce qui est logique car cette dernière a moins été restaurée.

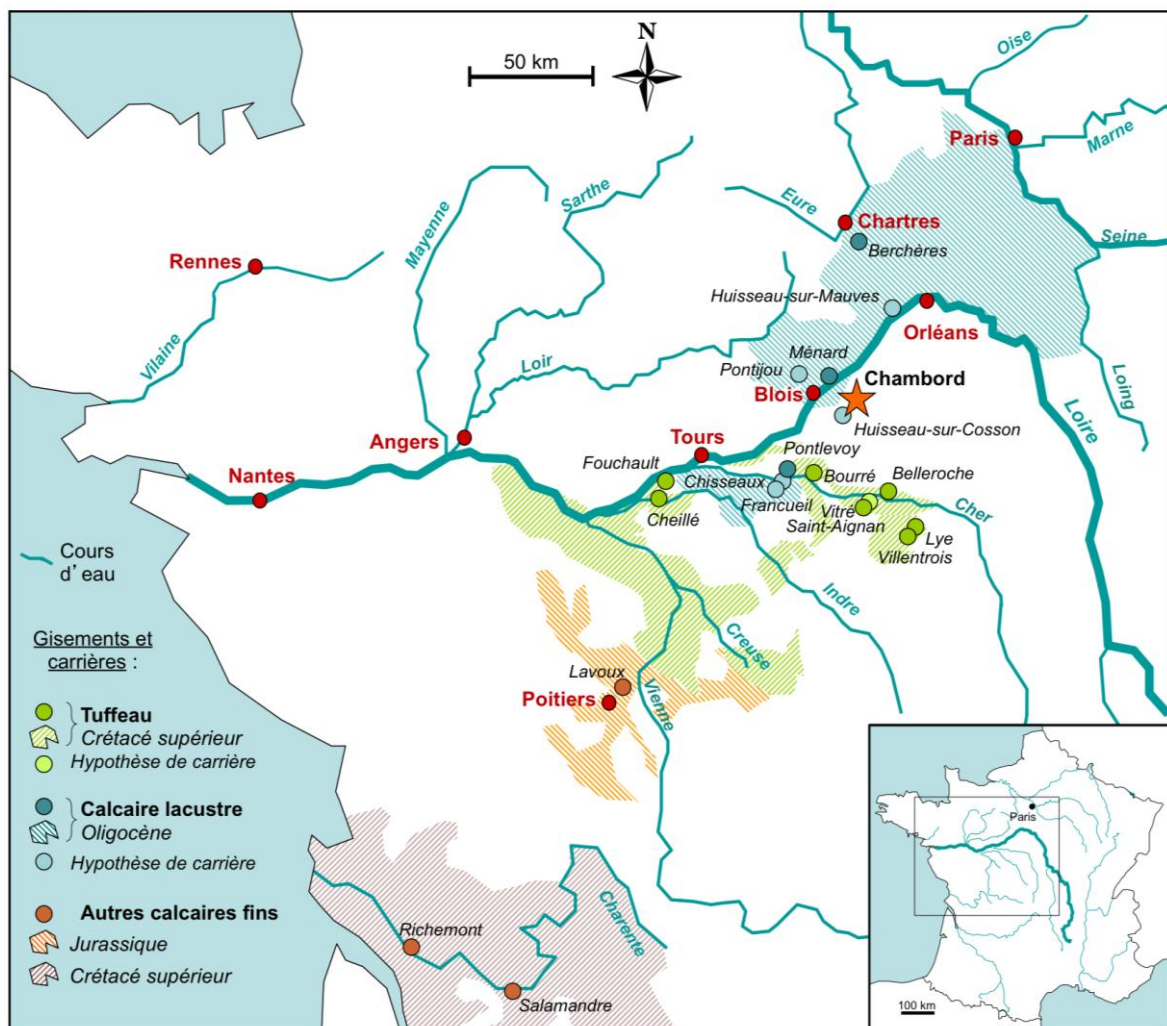


FIGURE 42 : CARTE DE LOCALISATION DES DIFFÉRENTES CARRIÈRES EXPLOITÉES AU COURS DU TEMPS POUR LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION ET DE RESTAURATION DE L'AILE SUD

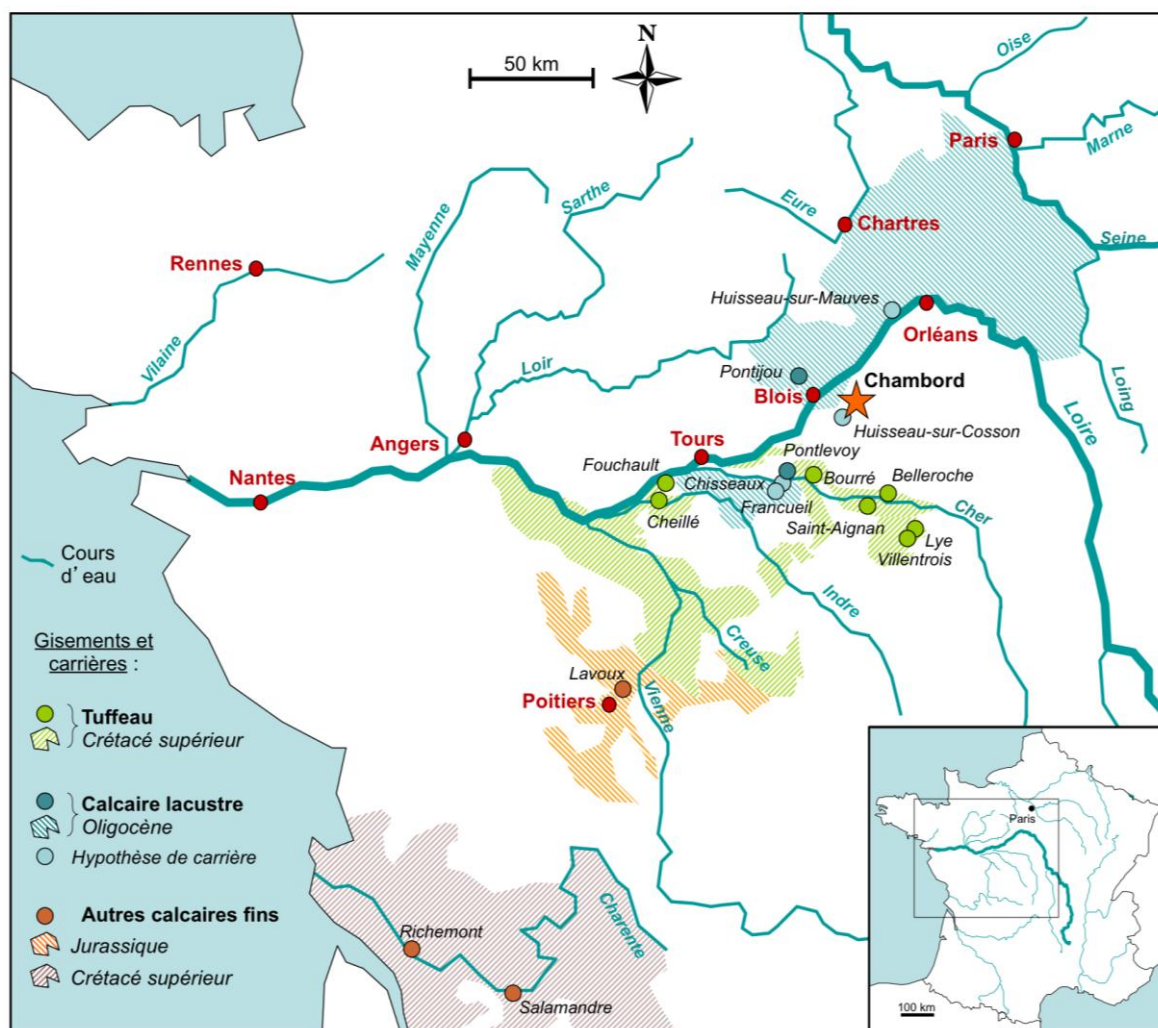


FIGURE 43 : CARTE DE LOCALISATION DES DIFFERENTES CARRIERES EXPLOITEES AU COURS DU TEMPS POUR LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION ET DE RESTAURATION DE LA TOUR DU CHAUDRON

4. CONCLUSION

Le rappel du cadre historique dans lequel se situe le château de Chambord a permis d'illustrer les différentes carrières exploitées ainsi que les choix techniques effectués au cours des siècles. Cet aspect, peu souvent abordé en ce qui concerne le château de Chambord, mériterait d'être poursuivi et développé plus en détails afin de compléter l'état des connaissances de l'histoire du château.

En effet, les deux façades étudiées ont fait l'objet d'une étude plus approfondie à l'échelle de la pierre. L'objectif était de pouvoir retracer les différentes étapes de construction et les restaurations qu'ont subies ces deux façades dans le temps. Ce travail d'enquête a sans cesse été perturbé par l'état lacunaire des sources, leur lieu de conservation et leur degré inégal de précision en fonction des périodes. A l'issue de ce travail, chaque pierre porte deux attributs : une date et une provenance. Cependant, celles-ci sont parfois incertaines et à défaut d'attributs précis, des caractéristiques plus élargies leur ont été attribuées : une période, une nature.

Afin d'établir le carnet de santé, les données manuscrites, iconographiques ou d'observations recueillies dans cette étude ont été croisées entre elles et un support graphique a été réalisé pour la représentation de ces données. Les cartographies réalisées permettent de mieux se rendre compte de l'étendue des restaurations effectuées sur ces façades. Les pierres de l'aile Sud et celles de la tour du Chaudron n'ont pas subi la même histoire, l'aile Sud a été très largement restaurée, plus de 50% des surfaces de pierres visibles ont été remplacées, alors que la tour du Chaudron, plus en retrait et moins prestigieuse sans doute, a beaucoup moins été remaniée, plus de 70% des surfaces de pierres étant d'origine. Les cartographies mettent également en évidence différentes natures de pierre, et notamment des calcaires fins, moins poreux et plus résistants que le tuffeau - tels que la pierre de Richemont - largement employés en restauration dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

CHAPITRE 3

DONNÉES DE L'ÉTAT ACTUEL DU MONUMENT

Le carnet de santé requiert la connaissance du passé du monument, traité dans le chapitre précédent, mais aussi l'étude de son état présent, et notamment des pathologies qui l'affectent.

Dans un premier temps, les conditions météorologiques subies par les pierres seront présentées dans leurs grandes lignes, de manière à dresser le contexte environnemental dans lequel s'initient et progressent les altérations.

Ensuite, les différentes altérations observables sur les parties étudiées du château de Chambord feront l'objet d'une description visant à les répertorier pour ainsi dresser le cadre hiérarchique de l'organisation des cartographies d'altérations.

Les cartographies d'altération seront réalisées suivant le même principe que celles de dates de pose et de provenance des pierres au chapitre précédent, cette fois-ci en s'appuyant exclusivement sur des observations in-situ de l'état actuel. De même, le tracé des altérations ne va pas suivre le contour des pierres, mais le contour des altérations elles-mêmes, les formes obtenues n'étant donc plus des formes proches du rectangle, mais plutôt des polygones irréguliers et complexes.

Enfin, ce chapitre sera aussi l'occasion d'analyser la distribution de ces altérations, notamment en corrélation avec les cartographies de datation et de nature des pierres issues du chapitre précédent. Complétée par la prise en compte du contexte environnemental, cette analyse croisée visera à fournir des éléments pour identifier les facteurs statistiquement associés à la formation des différents faciès d'altération. Le carnet de santé devient ainsi un outil d'aide au diagnostic d'ouvrage, permettant de mieux comprendre l'origine des pathologies pour mieux cibler les actions préventives et curatives à réaliser.

1. EXAMEN DES FAÇADES

L'étude de l'altération d'un monument passe par une observation attentive des parements et de leur environnement. Il ne s'agit pas ici de définir tous les facteurs environnementaux à l'origine des altérations, ni toutes les formes d'altération possibles. Seuls ceux relatifs au château de Chambord, et notamment aux deux façades étudiées seront présentés et définis à partir des connaissances admises par la communauté scientifique et décrites dans la littérature, mais aussi des observations réalisées *in situ*.

1.1. DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

1.1.1. ORIENTATION GÉNÉRALE DES FAÇADES

De manière générale, les différents reliefs d'un édifice (sculptures, parements lisses, corniches, ...) ne s'altèrent pas de manière uniforme car les parties les plus saillantes sont souvent les plus fragiles. Les reliefs retiennent l'humidité sur les faces horizontales, et génèrent une surface d'exposition plus élevée que sur un mur droit rapporté au volume de la pierre, ce qui conduit à des variations plus importantes (cinétique et amplitude) de température et d'humidité relative.

L'orientation des façades joue également un rôle dans le processus d'altération. La tour du Chaudron étant circulaire, l'ensemble des travées ne subit pas les mêmes conditions climatiques. En effet, l'ensoleillement direct, la direction du vent et des précipitations sont différents selon l'orientation des travées. De plus, une partie de la tour du Chaudron est bordée par les fausses braies qui donnent sur le canal du Cosson. Il faut noter que les fausses braies surplombent des douves qui ont longtemps été asséchées, et qui n'ont été remises en eau qu'en 1972. Le niveau d'eau dans les douves varie au cours de l'année, haut en été et très bas en hiver. Par ailleurs, les zones les plus restaurées et l'accessibilité au public ne concernent pas toutes les travées. La Figure 44 résume les données environnementales observées liées à la tour du Chaudron.

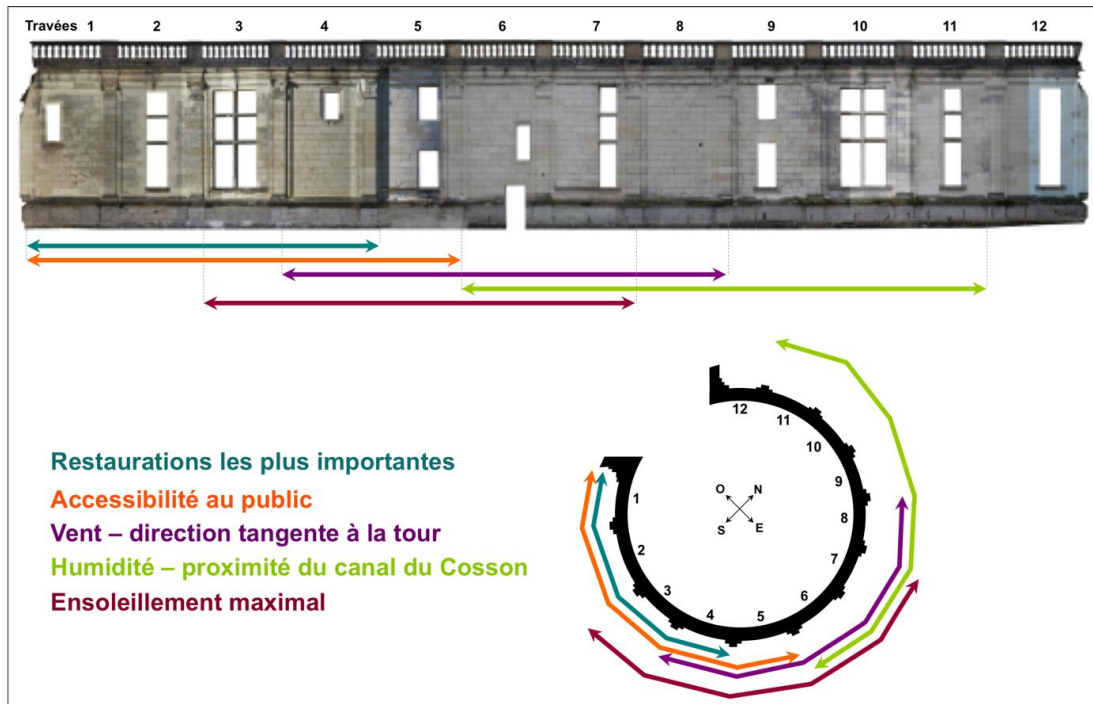


FIGURE 44 : REPRESENTATION DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES DE LA TOUR DU CHAUDRON, EN ELEVATION ET EN PLAN

À l'inverse de la tour du Chaudron, l'aile Sud ne possède qu'une seule orientation : Sud-Est. Les conditions environnementales sont donc proches de celles des travées n°4 et n°5 de la tour : pas de source d'humidité directement à proximité, ensoleillement maximal, et une position relativement abritée du vent. L'ensemble des façades était accessible au public jusqu'en 2010, mais la reprise des abords supprimant les chemins d'accès au pied des façades en limite désormais grandement l'accessibilité. Les zones les plus concernées par la proximité du public ou du personnel sont le Portail Royal et les deux portes latérales de la façade.

Concernant l'étude du sol, les fouilles réalisées en 2010-2011 montrent que l'aile Sud et la tour du Chaudron ont été élevées sur des fondations solides et régulières. Le terrain, tantôt marneux, tantôt d'un substrat calcaire selon les parties du château concernées, ne semble pas provoquer de désordres structurels visibles sur les façades étudiées, bien que des mouvements de terrains dus à une grande sécheresse en 1976 aient été signalés au niveau de la tour du Chaudron¹⁰². Enfin, il faut noter que pour les façades du château, il n'y a pas de risque d'apport d'eau par capillarité depuis le sol. En effet, le type de construction employé limite fortement ce risque : les élévations en pierres tendres reposent sur des fondations et un

¹⁰² Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 571, devis du 20 novembre 1979 et mémoire d'exécution des travaux de septembre 1981

soubassement en calcaire lacustre dont la nature et la porosité interdisent tout risque de remontées capillaires depuis le sol (voir chapitre 2 Figure 13).

Enfin, l'aménagement intérieur et les sources potentielles de perturbation (thermo-hydrauliques, mécaniques, chimiques) ont été étudiés et évalués. L'essentiel des informations à ce sujet se trouve dans le chapitre 2. L'organisation et l'activité intérieure n'ont bien sûr pas toujours été les mêmes au cours des siècles, mais l'épaisseur des murs (variant de 80 à 150 cm selon les endroits de la tour, et en moyenne de 120 cm pour l'aile Sud) et leur mode de construction (parements extérieurs en pierre de taille et blocage de mortier et de moellons entre les deux) limitent fortement les échanges entre l'intérieur et l'extérieur, de même que l'influence d'une source intérieure d'altération éventuelle, à l'exception de quelques cas qui seront cités et décrits lorsque nécessaire.

1.1.2. DONNEES METEOROLOGIQUES

Afin de mieux connaître l'environnement climatique des façades étudiées et d'évaluer l'importance des différents facteurs environnementaux sur les altérations, des appareils de mesure de température et d'humidité relative ont été installés au niveau de la tour du Chaudron (Figure 45).

Ces capteurs thermo-hygriques ont été positionnés directement dans la pierre et mesurent des informations toutes les 30 minutes¹⁰³. Cependant un certain nombre de contraintes techniques (accidents d'enregistrement ou de récupération des données) a parfois empêché d'obtenir des mesures continues sur l'ensemble de la période étudiée allant de juin 2008 à septembre 2012. Deux zones d'implantation ont été choisies : l'une au Nord sur la travée n°11 surplombant le canal du Cosson, l'autre au Sud sur la travée n°4, la plus ensoleillée de la tour. Les centrales de collecte des données sont situées au-dessus des travées concernées, sur la toiture terrasse de la tour. Pour chaque zone, les capteurs sont positionnés à trois hauteurs différentes, dans des blocs de tuffeau préalablement identifiés comme datant du XVI^e siècle. Les capteurs mesurent la température et l'humidité dans un orifice de diamètre 10 mm. Pour les deux emplacements extrêmes (en haut et en bas, respectivement à 6,5 et 3 m du sol), trois capteurs sont placés à des profondeurs différentes (15 mm, 30 mm et 50 mm). Pour l'emplacement central à un peu plus de 4,5 m du sol, deux capteurs ont été installés, l'un en surface, l'autre à une profondeur de 250 mm dans la pierre. L'aile Sud ayant une

¹⁰³ Capteurs de marque Almemo®, instrumentation Ahlborn, précision $\pm 2\%$ (HR) et $\pm 0,1$ K (T°)

orientation proche de celle de la travée n°4, les données recueillies sur les capteurs de cette travée, au Sud, lui seront appliquées.

Ces données peuvent ponctuellement être complétées si nécessaire par des mesures environnementales d'humidité relative et température de l'air, direction et vitesse du vent, pluviométrie, provenant de stations météorologiques installées dans le département du Loir-et-Cher ou du Loiret, dont les données sont régulièrement enregistrées, puis archivées et rendues publiques, permettant de combler les lacunes et d'apporter d'autres informations sur l'environnement climatique et atmosphérique de la région¹⁰⁴.

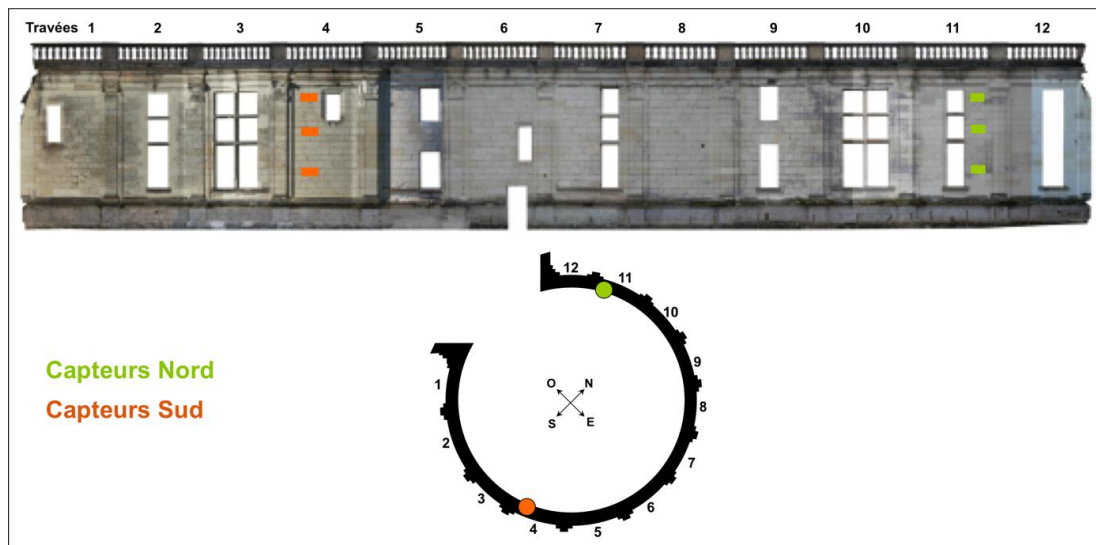


FIGURE 45 : EMBLEMENT DES CAPTEURS ET DE LA STATION METEO SUR LA TOUR DU CHAUDRON

Les données relevées depuis juin 2008 sont présentées ici jusqu'au mois de septembre 2012. De manière générale, les données observées sur trois années permettent notamment de constater que les températures et les hygrométries extérieures et de surface mesurées s'atténuent en fonction de la profondeur, avec un décalage variant dans le temps au cours de la journée. Les variations thermo-hydriques diminuent en fonction de la profondeur, et sont nettement plus faibles à 250 mm qu'en surface. Que ce soit au Sud ou au Nord, les pierres situées en hauteur subissent de plus grandes variations que celles situées en partie basse.

Les températures, parfois négatives en hiver même à l'intérieur de la pierre, sont en moyenne plus froides côté Nord. La Figure 46 représente la température à la surface d'une pierre et celle à 250 mm de profondeur, suivant son exposition durant la période mesurée. L'amplitude des températures journalières est près de deux fois plus importante sur le côté Sud par rapport au côté Nord. Les valeurs négatives sont relativement comparables bien

¹⁰⁴ Sites web Météo Centre (<http://www.meteo-centre.fr>) et Weather Spark (<http://www.weatherspark.com>)

qu'encore légèrement plus faibles sur le côté Sud, mais les valeurs positives sont bien supérieures au côté Sud. Ainsi, à la surface de la pierre, la température ne dépasse jamais les 30°C au Nord, alors qu'au Sud, les températures maximales moyennes enregistrées sont autour de 38°C. C'est l'année 2012 qui a connu la plus grande amplitude de température d'une saison à l'autre. Les températures à la surface de la pierre sont descendues jusqu'à -14°C en février 2012, atteignant également les 0°C à une profondeur de 250 mm, et sont montées jusqu'à 39°C en Août 2012. Les températures mesurées à 250 mm à l'intérieur de la pierre suivent les mêmes tendances que celles mesurées en surface, mais de manière fortement atténuée, se situant à la moyenne de l'amplitude journalière, variant peu au cours de la journée.

Les températures minimales mesurées au cours de ces trois années conduisent à s'interroger sur la situation de Chambord et son rapport au gel, agent souvent tenu responsable de fortes dégradations (Thomachot, 2002). La norme NF B10-601 définit sur une échelle quatre zones de gel en fonction des températures mesurées et du nombre de jour de gel¹⁰⁵. Selon cette norme, les températures relevées par les stations météorologiques de la région situeraient Chambord dans une zone de gel faible à très faible, le nombre de jours consécutifs où les températures négatives perdurent n'excédant pas quatre. Ce n'est donc pas une zone climatique aux conditions extrêmes, même si les effets du gel peuvent être importants lors d'épisodes de baisse de température importante et brutale comme ceux mesurés en 2012.

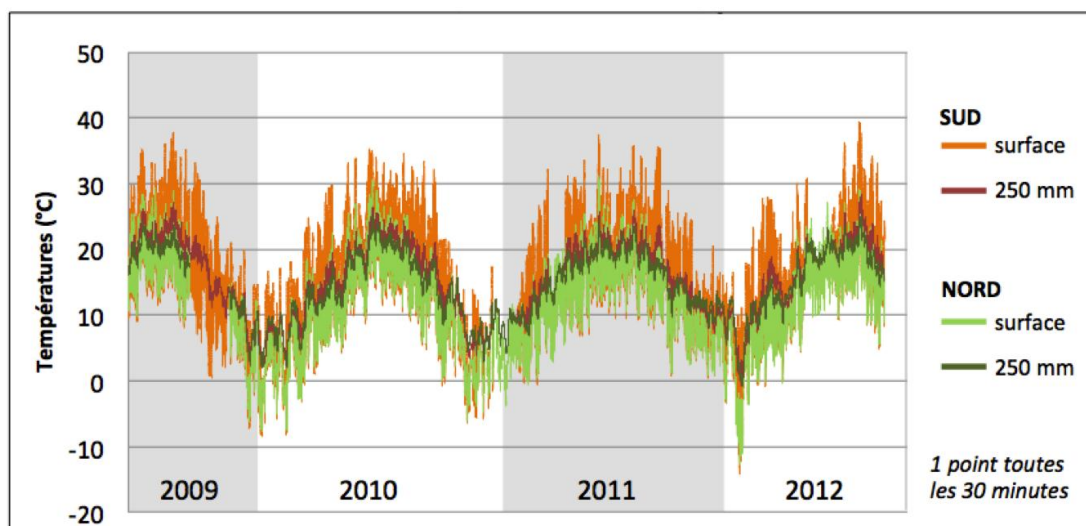


FIGURE 46 : TEMPERATURE MESUREE A LA SURFACE ET A 250 MM DE PROFONDEUR D'UNE PIERRE, SELON SON EXPOSITION AU NORD OU AU SUD

¹⁰⁵ Norme NF B 10-601, 2006 – Source : ouvrage *Pierre et Patrimoine*, 2009

La Figure 47 représente l'humidité relative à la surface et en profondeur d'une pierre (250 mm) suivant son exposition et durant la période mesurée. Les valeurs mesurées sont beaucoup plus variables et moins régulières que les températures, bien qu'une tendance se dessine : les valeurs sont faibles en été et élevées en hiver, à l'inverse des températures mesurées aux mêmes dates.

On constate que les valeurs de l'humidité relative mesurées au Nord sont légèrement plus importantes que celles mesurées au Sud (73 % HR en moyenne au Nord, contre 68 % au Sud). La proximité d'une source d'humidité comme le canal du Cosson et l'ensoleillement moindre des travées Nord par rapport aux travées Sud contribuent à cette différence d'humidité relative. À 250 mm de profondeur, les valeurs sont beaucoup plus atténuées et les amplitudes journalières et annuelles sont nettement moins importantes que celles mesurées en surface. La différence Nord/Sud reste cependant visible.

Enfin, on peut remarquer que, à l'inverse des températures où les valeurs de surface et de profondeur étaient bien corrélées entre elles, les valeurs des humidités relatives mesurées en surface et en profondeur suivent une tendance inverse, en déphasage : lorsque l'humidité est forte en surface, celle-ci est faible en profondeur, ce déphasage pouvant par exemple être attribué à la progression dans la pierre d'un front d'imbibition puis d'évaporation, ou à une certaine inertie du matériau.

L'humidité du sol ne peut être tenue pour responsable d'un apport d'humidité aux pierres des façades. L'humidité contenue dans la pierre ne provient donc que des eaux de pluie et de la captation de l'humidité relative de l'air extérieur. Les pics de forte humidité sont uniquement liés aux épisodes de pluie, puisqu'à une pluie battante correspond généralement un pic d'humidité supérieur à 95 %, notamment au Sud où la façade est soumise aux vents. Cette même façade, plus ensoleillée, présente des pics de faible humidité, moins de 50 % voire moins de 40 %, qui sont dus au plus grand ensoleillement de cette partie de la tour.

Ces informations constituent le contexte environnemental des parties étudiées du château de Chambord. Elles seront utilisées au cours de ce chapitre pour apporter des éléments de critique lors de la proposition d'hypothèses concernant les facteurs associés au développement des altérations.

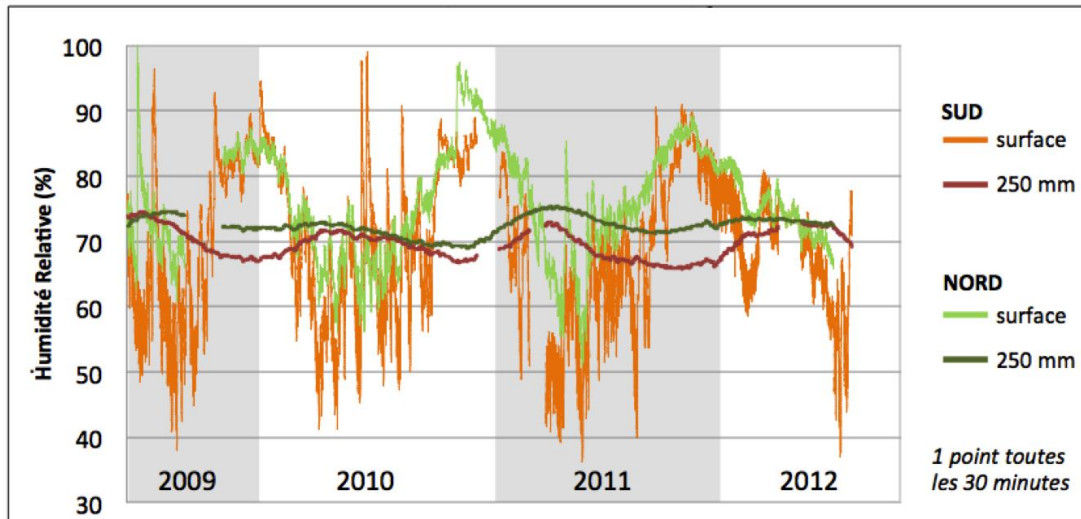


FIGURE 47 : HUMIDITE RELATIVE MESUREE A LA SURFACE ET A 250 MM DE PROFONDEUR D'UNE PIERRE, SELON SON EXPOSITION AU NORD OU AU SUD

1.2. ALTERATIONS DES PIERRES EN PLACE

1.2.1. CONTEXTE

Les parements du château de Chambord présentent divers types de dégradation. La tour du Chaudron, peu restaurée, est représentative de ces différents faciès d'altération.

Il n'est pas forcément pertinent ou évident de distinguer de manière cloisonnée les différentes dégradations rencontrées, car les différentes formes d'altération sont parfois différentes étapes d'un même processus d'altération. La terminologie à employer et la classification des altérations de la pierre ont cependant clairement été définies dans un glossaire publié par l'ICOMOS¹⁰⁶. Cette présentation des formes d'altération est globalement dissociée de leurs causes, ce qui convient à l'étude descriptive des altérations proposée dans ce paragraphe. Cinq grandes catégories de figures d'altération ont alors été répertoriées :

- les altérations chromatiques et dépôts
- les colonisations biologiques
- les figures induites par une perte de matière
- les fissures et déformations
- les détachements

¹⁰⁶ ICOMOS-ISCS, 2008, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre – téléchargeable en ligne : http://international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf

Certaines des catégories d'altération et des sous-catégories qui les composent affectent les pierres du château et occupent une part plus ou moins importante des façades étudiées.

La présentation des altérations sera faite en fonction de cette terminologie, mais sera proposée dans un ordre différent, pour des raisons de clarté. Nous verrons que, bien que classées dans des catégories différentes, les formes d'altération sont souvent liées entre elles par une relation de cause à effet.

1.2.2. ALTERATIONS CHROMATIQUES ET DEPOTS

Au sein même des tuffeaux, différentes teintes existent, d'un ocre presque blanc à un ocre beaucoup plus jaune, selon la carrière de provenance du tuffeau, ou le banc duquel la pierre a été extraite (Rautureau, 2011). Une fois la pierre mise en place sur le monument, avec le temps, la surface exposée à l'air durcit et se recouvre d'une patine naturelle, accentuant ces différences de teintes initiales (Brunet-Imbault, 1999). Un autre type de variation chromatique est observable. Il s'agit des couleurs des différentes pierres en présence d'humidité, et notamment après un épisode de pluie. Le tuffeau, selon sa provenance, tend vers une couleur légèrement verdâtre, alors que la pierre de Richemont a tendance à rougir (Figure 48).

Cependant, ces modifications de surface ne sont pas des dégradations à proprement parler, car elles sont une altération naturelle lente et systématique, traduisant le vieillissement naturel de la pierre sans perte de matière. Les variations chromatiques engendrées par ces phénomènes sont faibles, voire temporaires (pluies), et aucune de ces altérations n'est jugée comme inesthétique ou dangereuse pour la durabilité des pierres.

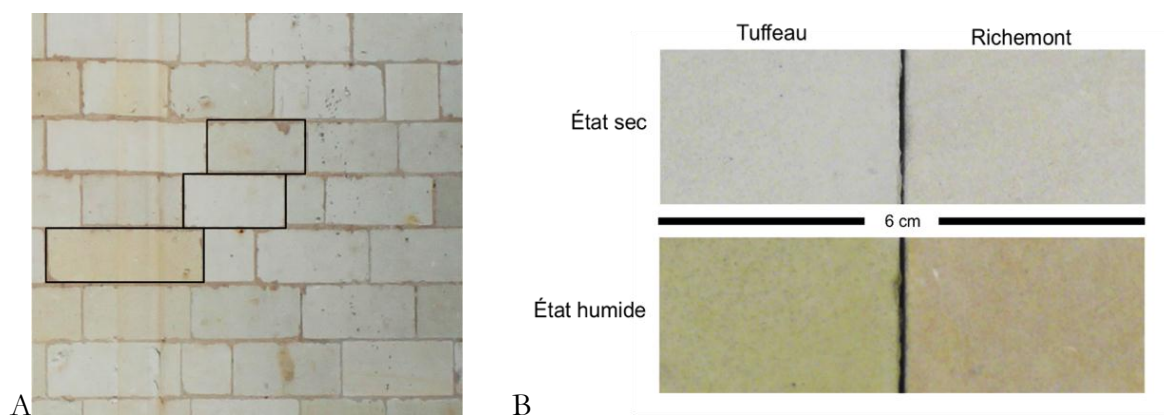


FIGURE 48 : VARIATIONS CHROMATIQUES NATURELLES DU TUFFEAU, PAREMENTS DE L'AILE SUD (A). ET VARIATIONS CHROMATIQUES DU TUFFEAU ET DE LA PIERRE DE RICHEMONT ENTRE L'ÉTAT SEC ET L'ÉTAT HUMIDE, PIERRES SAINES EN LABORATOIRE (B)

De plus, les dépôts tels que définis dans le glossaire ICOMOS (croûtes, encroûtements, efflorescences, soiling, etc.) n'existent pas sur les façades étudiées. En effet, la pollution particulaire constitue souvent le facteur principal à l'origine de ces dépôts, mais la position géographique de Chambord, au milieu de la forêt et loin de toute grande ville, minimise *a priori* fortement l'influence de ce facteur. Les formes d'altération courantes en milieu urbain, comme les croûtes noires, sont donc totalement absentes des façades du château, de même que toutes les autres formes d'altérations entrant dans cette catégorie.

1.2.3. COLONISATIONS BIOLOGIQUES

Un autre type d'altération se développe sur les façades du château, entraînant également des colorations des parements, et qui parfois masquent toute autre altération chromatique citée plus haut : il s'agit des colonisations biologiques. Le développement de ces dégradations dépend de divers facteurs comme l'emplacement et l'orientation des pierres sur le bâtiment, et les conditions environnementales (température, humidité relative, précipitations, vent, ensoleillement, composition du substrat, etc.) (Gaylarde *et al.*, 2003). Elles sont sensibles à la pollution atmosphérique qui contribue à leur régression (Caneva *et al.*, 1995 ; Del Monte et Sabbioni, 1986).

Il semble y avoir deux sortes de colonisations biologiques sur les façades étudiées ici :

- Les mousses, qui sont des végétaux primaires ne développant pas de réseau de racines s'incrétant dans la pierre, mais en revanche, formant une épaisseur végétale pouvant aller jusqu'à plusieurs centimètres sur la surface de la pierre. L'état des mousses dépend du pourcentage d'humidité ambiant (Caneva et Salvadori, 1978). Une corniche avec un relief horizontal est généralement plus recouverte de mousse (en raison de l'accumulation d'eau météorique) qu'une face verticale (qui sèche rapidement), comme on peut le voir sur la première image de la Figure 49.
- Les lichens, qui sont de nature et de couleur variées (gris, noirs, verts, parfois plus orangés), présentés à la Figure 49. Les lichens sont des organismes formant une symbiose entre une algue et un champignon. Certains lichens sont endolithiques, c'est à dire qu'ils sont implantés directement dans la pierre grâce à leurs rhizines, pouvant causer des dégâts sur l'épiderme de la pierre (piqûres ou cavités par exemple). Les dégradations peuvent également être de nature chimique, les lichens produisant des acides (comme

l'acide oxalique par exemple) susceptibles de réagir avec les composés de la pierre et notamment la calcite. Les lichens peuvent couvrir l'ensemble des parements en pierre et des joints de mortier verticaux, et croissent en raison de 10 mm par an en moyenne. Il faut cependant des conditions environnementales particulières, de fortes humidités et une lumière indirecte, pour que ceux-ci se développent (Warscheid et Braams, 2000 ; Lallemand, 1992 ; Caneva et Salvadori, 1987).

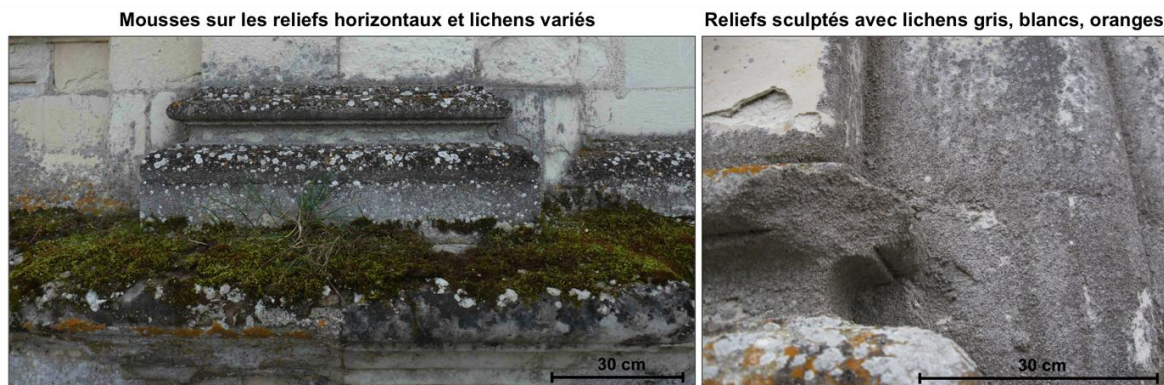


FIGURE 49 : EXEMPLE DE MOUSSES ET DE LICHENS PRESENTS SUR LES FAÇADES

Souvent jugées inesthétiques, ces altérations sont éliminées par divers procédés de nettoyage, chimiques ou mécaniques. Mais ces nettoyages ne sont jamais définitifs et les colonisations biologiques se réinstallent généralement sur les façades nettoyées. Le nettoyage par brossage n'est en effet pas le plus efficace puisque seule la surface est éliminée alors que les rhizines restent implantés dans la pierre, permettant ainsi de nouveau le développement de l'activité lichénique (Lallemand, 1992). De plus, la succession de nettoyage n'a pour conséquence que de fragiliser la pierre, c'est pourquoi il peut parfois être préférable de ne pas y toucher, la prolifération ayant tendance à se stabiliser dans le temps si l'environnement n'est pas modifié. De plus, ces altérations ne sont souvent que superficielles. Elles n'endommagent pas systématiquement la pierre en profondeur, et leurs effets sont relativement réversibles. Les colonisations biologiques peuvent cependant être impliquées dans d'autres processus d'altération, puisqu'elles contribuent à l'accumulation d'humidité en surface de la pierre.

À Chambord, les nettoyages de colonisations biologiques ne sont pas systématiques, et sont faits uniquement par brossage doux à l'eau claire. Dans certains cas, une pression n'excédant pas 1 bar est utilisée. Aucune mention de nettoyage n'est faite dans les archives pour les façades étudiées, mais pour d'autres façades du château, les résultats de nettoyage sont satisfaisants, la pierre sous-jacente n'ayant pas subi de dommages importants du fait de la présence d'une activité biologique.

1.2.4. FIGURES INDUITES PAR UNE PERTE DE MATIERE

Ces pertes de matière, telles que définies par l'ICOMOS, décrivent des morphologies d'altérations superficielles. Celles observées sur les façades sont uniquement d'origine mécanique : des traces d'impacts de projectiles, des rayures ou incisions, très souvent la conséquence de graffitis gravés dans la pierre tendre, réalisés à diverses périodes, et en encore plus grand nombre depuis que le château est ouvert au public pour les visites. Ces types d'altération, illustrés à la Figure 50, sont donc uniquement des conséquences d'actions anthropiques.

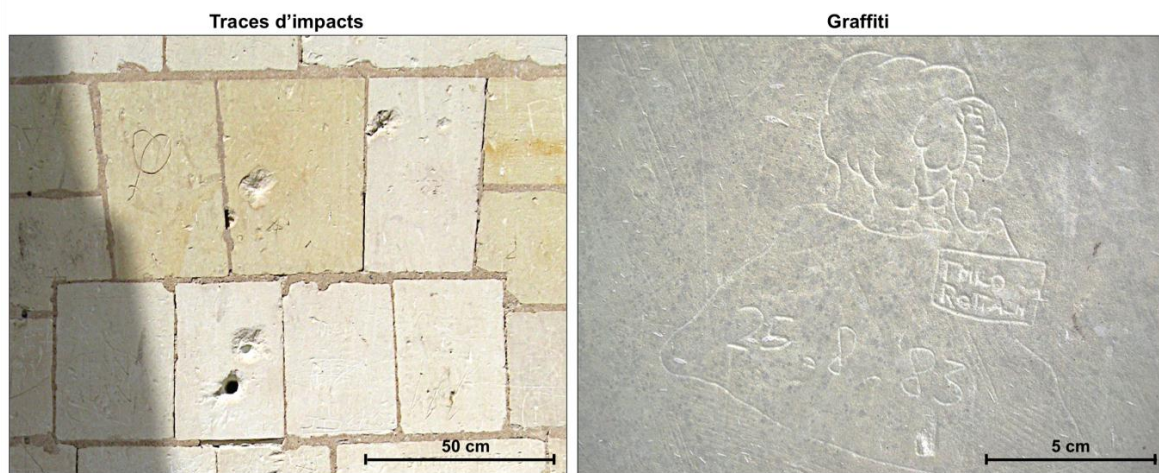


FIGURE 50 : EXEMPLE D'ALTERATIONS ANTHROPIQUES

Les parties manquantes sont les plus importantes au niveau des parties sculptées et en relief. On note des cassures franches illustrées sur la Figure 51, au niveau du stylobate de certaines travées et des appuis de fenêtre de certaines baies, ainsi qu'un trou au niveau de la corniche de la neuvième travée, résultant de la disparition d'un bloc de pierre (déjà tombé ou déposé en 1998 - Thomachot, 1998).



FIGURE 51 : EXEMPLES DE PARTIES MANQUANTES ET CASSURES

Une érosion de la surface des pierres est parfois observée sur le château de Chambord, notamment en parties hautes, mais n'est pas présente au niveau des façades étudiées. De même, l'alvéolisation, qui est une dégradation du tuffeau citée dans la littérature, n'est pas un phénomène d'altération observé, car il concerne généralement plutôt des tuffeaux du turonien supérieur, plus granuleux, plus grossiers et plus jeune que ceux employés au château Chambord (Jeannette *et al.*, 1985a).

1.2.5. FISSURES ET DEFORMATIONS

Aucune déformation n'est à noter, mais on remarque en revanche de nombreuses fissures, très fines, se développant généralement sur les côtés des pilastres, les ébrasements des baies, ou les pierres jouxtant les portes murées (Figure 52). Il semblerait qu'elles puissent favoriser et aggraver un autre processus d'altération décrit plus loin : le détachement de plaques par desquamation.



FIGURE 52 : EXEMPLE DE FISSURES SUR LE COTE D'UN PILASTRE

1.2.6. DETACHEMENTS

Les détachements de pierre observés sur les façades sont classés sous le nom de « desquamations ». Ces phénomènes d'altération ont parfois été nommés selon leur épaisseur : « plaques », « écailles », « squames », « peaux », « pellicules », ou selon leur aspect « pulvérulence », « exfoliation », « effritement », « mille-feuilles ».

Dans notre cas, suivant l'emplacement des pierres sur le bâtiment, on rencontre des desquamations dites « en plaques » ou « en feuillets » :

- Les desquamations en feuillets se développent sous des parties saillantes, souvent arrondies, et dans des zones abritées, au niveau de parties inférieures de reliefs. La pierre se desquame par écailles et feuillets très fins, d'ordre millimétrique (Figure 53). La pierre présente alors une absence de cohésion sur une certaine épaisseur, parfois plus d'un centimètre. Cette altération commence bien souvent par une boursouffure fine de la surface de la pierre.

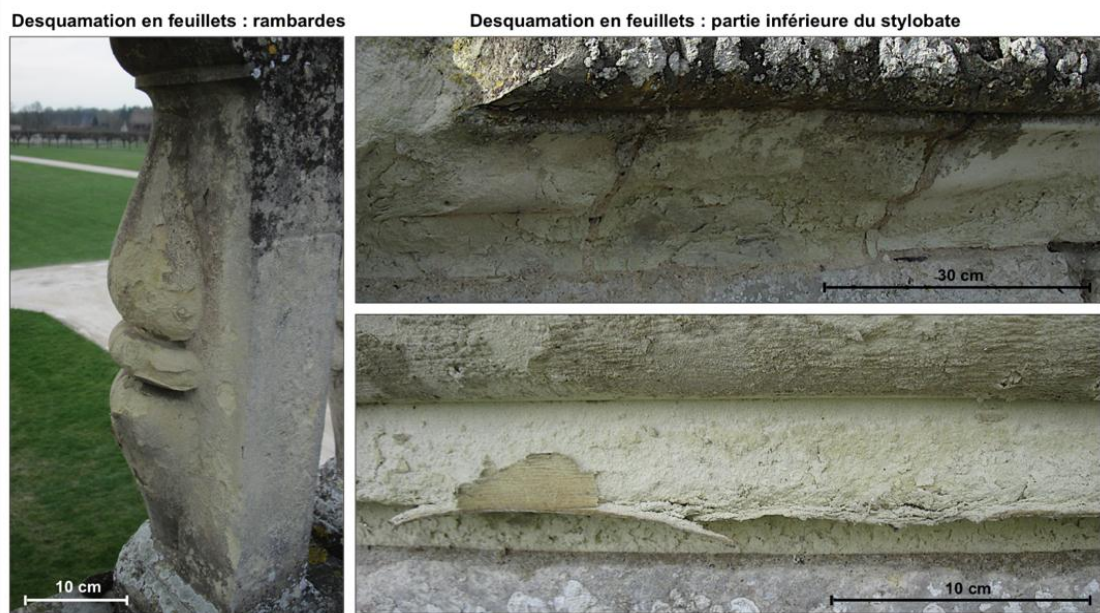


FIGURE 53 : EXEMPLES DE DESQUAMATION EN FEUILLETS

- Les desquamations en plaques constituent l'altération la plus dommageable rencontrée sur le château de Chambord. Elles affectent notamment les parements de murs lisses, et sont souvent initiées par les angles des pilastres, les encadrements des baies ou les joints de maçonnerie (Jeannette, 1992). Une fissure se crée, parallèlement à la surface, à un ou deux centimètres de profondeur environ, formant une plaque qui devient de moins en moins solidaire du mur, suivant la propagation de la fissure. La plaque se détache ensuite, laissant à nu une surface pulvérulente (Figure 54). Cette pulvérulence n'est pas une altération en elle-même, elle est le dernier des stades de développement de l'altération en plaques, qui débute par une fissure, semblable dans certains cas à celles observées à la Figure 52. La plaque peut occuper une partie d'une pierre, l'ensemble d'une pierre, la

propagation étant stoppée par le mortier de rejointoiement, ou encore un ensemble de pierres jointives d'un parement, incluant les joints de mortier.

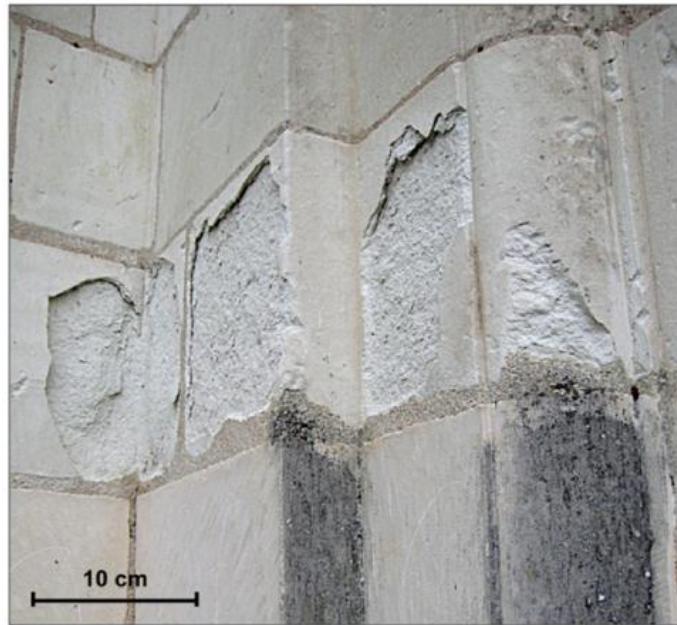


FIGURE 54 : EXEMPLE DE DESQUAMATION EN PLAQUES SUR L'AILE SUD

2. DISTRIBUTION SPATIALE DES ALTÉRATIONS

Sur la base des différentes dénominations exposées précédemment, des cartographies ont été réalisées. Le relevé de ces altérations a été fait par examen visuel des façades, pour permettre d'attribuer à chaque type d'altération observé la nomenclature qui lui correspond, et afin de localiser pierre à pierre ces altérations sur le monument.

Les cartographies de relevé des altérations obtenues seront ensuite croisées avec les cartographies de provenance des pierres réalisées dans le chapitre précédent, afin d'affiner la compréhension de l'état d'altération du monument.

Pour simplifier la lecture de la cartographie générale incluant tous les types d'altération, les altérations biologiques seront divisées en deux classes, les lichens et les mousses, sans que les différentes natures et couleurs de lichens ne soient différenciées.

Parmi les altérations recensées au début de ce chapitre, toutes ne sont pas représentées sur ces cartographies :

- Soit parce qu'elles ont été jugées comme ponctuelles et non significatives dans l'étude spatiale et statistique de l'état d'altération de ce monument. C'est le cas des impacts de projectiles et des graffitis.
- Soit parce qu'elles sont difficilement cartographiables. C'est le cas des fissures qui sont localisées sur les côtés des pilastres et donc non visibles sur la frise dont le point de vue est strictement orthogonal à la façade, et qui, bien que pertinentes, sont présentes à une échelle minime du point de vue statistique. Leur importance et leur rôle ne seront cependant pas négligés dans l'étude.

D'autres altérations seront bien cartographiées, car leur proportion n'est pas négligeable : il s'agit des cassures. Cependant, ces altérations étant essentiellement anecdotiques et leur origine étant bien souvent anthropique, leur répartition ne sera pas discutée.

2.1. LOCALISATION DES ALTERATIONS SUR LES FAÇADES

La localisation des altérations en fonction du relief et de l'orientation doit être évoquée dans un premier temps sans parler de quantité, d'importance ou de proportion.

De manière générale, on remarque que les parties les plus altérées sont localisées dans les zones aux plus forts reliefs, en partie haute (les chapiteaux sculptés, les corniches saillantes de l'entablement, les rambardes) comme en partie basse (le stylobate saillant et des bases des pilastres, ou encore les appuis de fenêtres). Les soubassements et la partie centrale des murs, qui ne comportent presque que des parements verticaux, sont globalement moins sujets aux altérations autres que biologiques. Le développement de ces altérations, relativement réversibles, est directement lié à l'orientation et l'environnement du bâtiment, à l'inverse des autres altérations mentionnées, irréversibles celles-là car occasionnant une dégradation structurelle de la pierre, pour lesquelles l'origine du développement est moins aisément identifiable.

2.1.1. COLONISATIONS BIOLOGIQUES

Les Figure 55 et Figure 56 présentent respectivement les cartographies de répartition des altérations sur la tour du Chaudron et sur l'aile Sud¹⁰⁷. La tour est presque entièrement couverte de lichens, à l'exception des travées n°4, 5, 6 et 7, exposées au Sud et à l'Est, qui sont les plus ensoleillées. On remarque que du lichen se développe sur les faces latérales des pilastres qui encadrent ces travées, mais leur position diffère en fonction de l'orientation des pilastres. Si l'on part des premiers pilastres à gauche, près de l'aile Sud, le lichen est préférentiellement disposé sur le côté gauche des pilastres, sur toute la hauteur. Plus on avance vers le milieu de la tour, moins il y a de lichens sur cette face gauche, jusqu'au pilastre n°6 qui ne présente de colonisation lichénique sur aucune de ses faces. Le lichen se développe ensuite à nouveau sur les pilastres suivants, mais cette fois sur la partie droite des pilastres, en quantité croissante. Ce pilastre n°6 est strictement orienté plein Est, au soleil levant, faisant de cette zone la plus longuement éclairée de la journée, or les parties où se développent le lichen sont celles qui restent le plus souvent à l'ombre. Dans les travées centrales, les conditions météorologiques ne sont pas favorables au développement du lichen. Celui-ci se développe mieux à l'abri de la lumière directe et dans un environnement humide (Caneva et Salvadori, 1987). En effet, les données météorologiques relevées ont montré que l'humidité relative en surface de la pierre est en moyenne 10 % supérieure en partie Nord, que sur les travées exposées au Sud, celles exemptes de lichens. Cependant, ces remarques ne s'appliquent qu'aux parties centrales des parements, parce que quelle que soit l'orientation des travées, les parties saillantes du stylobate, de la corniche et des balustrades sont systématiquement couvertes de lichen, les reliefs horizontaux favorisant une accumulation d'eau, nécessaire et suffisante, au développement de ce dernier.

Il faut toutefois remarquer que vue leur exposition, les deux dernières travées de la tour contiguës aux communs d'Orléans devraient être couvertes de lichens (Figure 55). Pour expliquer l'absence de lichens sur ces deux travées, il faut rappeler que de nombreuses pierres y ont récemment été remplacées, et d'autres nettoyées, comme décrit dans le chapitre précédent.

Les mousses, quant à elles, sont préférentiellement localisées sur les parties horizontales formées par les moulures du stylobate ou de la base du soubassement, là où l'apport en eau est le plus important, grâce à l'accumulation des eaux de pluie stagnantes sur les reliefs

¹⁰⁷ Pour une meilleure visualisation des données, l'annexe 4.3 présente en format A3 les cartographies d'altération des pierres de l'aile Sud et de la tour du Chaudron

horizontaux. On peut cependant remarquer que les mousses sont essentiellement présentes sur les reliefs des travées non accessibles au public (les travées accessibles au public étant, quant à elles, mieux et plus souvent entretenues, et aussi plus ensoleillées) et les plus à l'abri de la lumière (et donc d'un séchage direct).

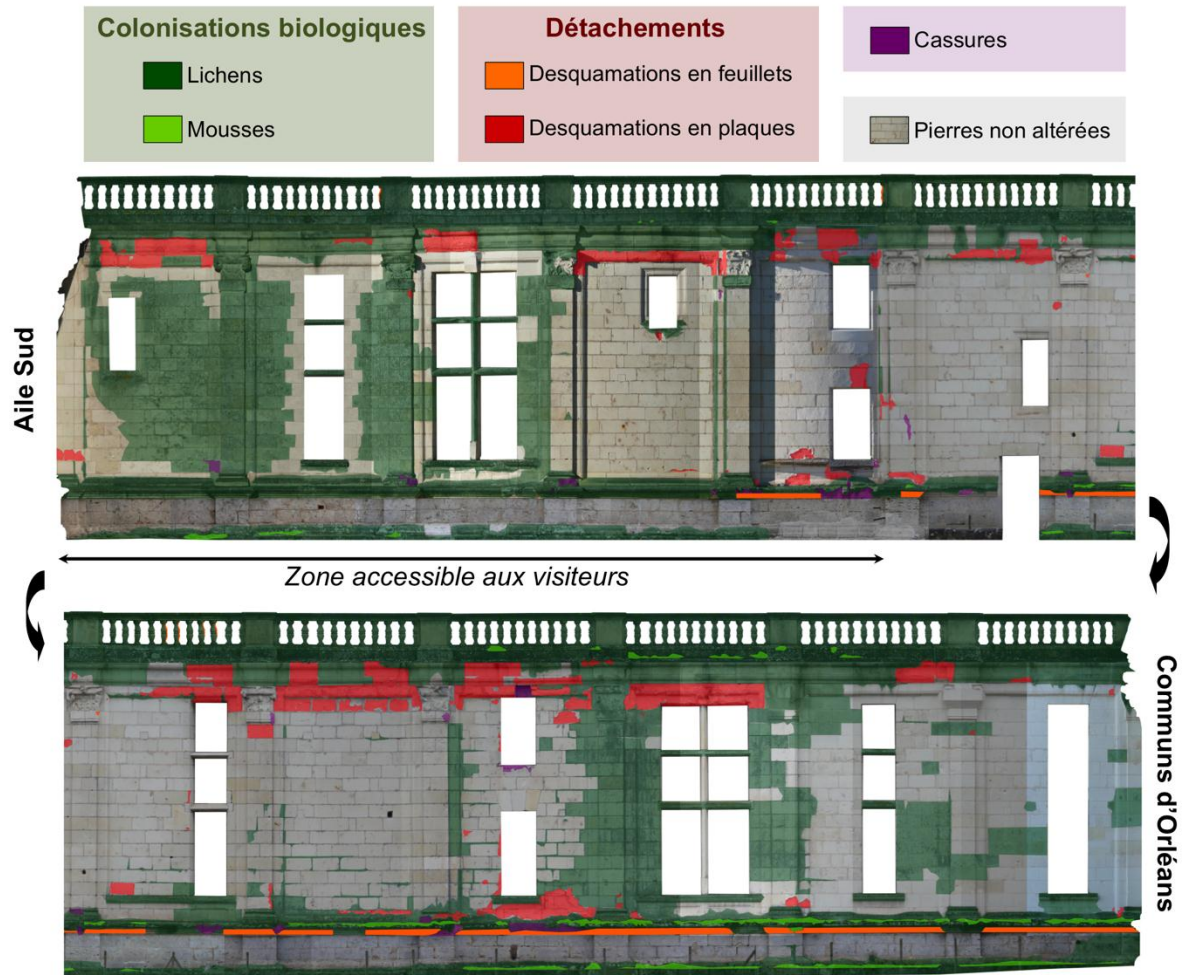


FIGURE 55 : CARTOGRAHIE DE REPARTITION DES ALTERATIONS SUR LA TOUR DU CHAUDRON

À l'inverse de la tour du Chaudron, l'aile Sud (Figure 56) est entièrement exposée selon une seule direction : le Sud-Est. L'ensoleillement continu au cours de la matinée freine le développement d'altérations biologiques et notamment de lichens sur les parements lisses. L'orientation étant comparable aux travées n°4 et n°5 de la tour, le développement lichénique est également comparable, à l'exception des côtés des pilastres, exempts de lichens. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'aile Sud a été généralement mieux entretenue que la tour, ce qui a empêché ou du moins limité leur implantation et leur prolifération. En revanche, des lichens de diverses variétés sont présents sur les parties en relief comme le stylobate, les bases des pilastres, les appuis de fenêtres et les corniches. La main courante de la balustrade est systématiquement recouverte de lichens, mais dans le cas des balustres, on peut remarquer

que la proportion de lichens augmente progressivement des balustrades contiguës à la tour de Princes, vers celles contiguës à la tour du Chaudron, entièrement couvertes de lichens comme celles de la tour.

Enfin, les bases des pilastres du Portail Royal, ainsi que le stylobate des deux parties extrêmes de l'aile, à gauche de la porte de gauche et à droite de la porte de droite, possèdent un relief beaucoup plus saillant que sur le reste de l'aile. L'accumulation d'humidité est favorisée par ce relief et c'est sur ces parties que le développement de lichens est le plus important. Peu de mousses sont présentes sur l'aile Sud, si ce n'est au niveau des appuis des fenêtres par endroit.



FIGURE 56 : CARTOGRAPHIE DE REPARTITION DES ALTERATIONS SUR L'AILE SUD

2.1.2. CASSURES ET DETACHEMENTS

Outre les colonisations biologiques relativement envahissantes, d'autres types d'altération se développent sur les façades, dans des proportions moindres mais beaucoup plus destructrices et complètement irréversibles (Figure 55 et Figure 56).

On note par exemple des cassures sur la tour du Chaudron, alors qu'aucune altération de cette nature n'a été relevée sur l'aile Sud plus souvent restaurée. Il existait par exemple des cassures de ce type au niveau du soubassement du Portail Royal, qui ont été restaurées en 2012, ce qui explique l'absence de cette surface altérée sur les cartographies. Ces altérations sont uniquement liées à des zones en relief, et ne sont pas influencées par le climat. Il est probable que dans les cas observés, ces altérations soient plus souvent dues à des actions anthropiques ou mécaniques, qui ont lieu de manière anecdotique. Aucune altération de ce type n'affecte les parements droits des murs, si ce n'est la présence éventuelle de trous de boulins non comblés, mais cette particularité n'a pas été considérée comme une altération.

Que ce soit sur l'aile Sud ou la tour du Chaudron, les desquamations en feuillets sont localisées dans des zones abritées de l'action directe des pluies et de la lumière, ainsi que de celle du vent.

Sur la tour du Chaudron, ces desquamations en feuillets sont majoritairement localisées sous le stylobate. Les quatre premières travées ne sont pas concernées par cette altération, mais on sait que les pierres du stylobate de ces travées ont été récemment remplacées (Chapitre 2). De plus, six balustres (petits piliers de la balustrade) présentent également des desquamations en feuillets, quatre d'entre eux étant localisés au-dessus de la travée n°7.

Pour l'aile Sud, les desquamations en feuillets sont localisées dans la zone abritée formée par le dessous des corniches en relief et le linteau des fenêtres coupant les premières assises moulurées de la corniche. Aucune desquamation en feuillets n'est observée sous le stylobate, pas même sur les parties les plus saillantes aux extrémités de l'aile. La remarque formulée pour les premières travées de la tour du Chaudron est la même pour l'aile Sud : ces pierres ont été remplacées à des dates récentes.

Enfin, les desquamations en feuillets sont abondantes et presque systématiques sur les parties abritées des balustres couronnant l'aile. Leur présence est récurrente sur le côté des balustres orientés vers la tour du Chaudron (Nord-Est), et est un peu moins fréquente sur le

côté orienté vers la tour des Princes (Sud-Ouest). Cette localisation d'altération est la même que pour les quelques balustres concernés sur la tour, au niveau de la travée n°7. De plus, notons que la rambarde opposée de la terrasse de l'aile Sud, donnant sur la cour du château, présente cette même répartition d'altérations en feuillets, mais dans des proportions moindres. La Figure 57 illustre cette répartition des desquamations en feuillets. La direction du vent est relativement régulière à Chambord, et souffle depuis le Sud/Sud-Ouest, les desquamations en feuillets se développent à l'opposé, dans la zone du balustre qui est abritée du vent et où l'eau s'accumule préférentiellement sans lessivage. Cette disposition préférentielle permet d'appuyer l'hypothèse que le vent favorise une cinétique de séchage rapide tandis que la formation de feuillets semble nécessiter le contraire.



FIGURE 57 : ORIENTATION LA PLUS FREQUENTE DES DESQUAMATIONS EN FEUILLETS SUR LES BALUSTRES DE L'AILE SUD

Pour finir, les desquamations en plaques, plus visibles et plus étendues que les desquamations en feuillets, n'affectent pas des zones abritées, mais au contraire des pierres exposées. La distribution des zones présentant une desquamation en plaques est indépendante de l'orientation des travées, toutes peuvent être affectées par ce type d'altération. Pour l'aile Sud comme pour la tour du Chaudron, les desquamations en plaques sont uniquement localisées entre la partie supérieure du stylobate et la corniche (incluse, dans le cas de la tour du Chaudron). Elles n'affectent que peu la partie centrale des travées, mais plutôt les extrémités hautes et basses des travées, au niveau des parements droits comme au niveau de certains reliefs.

On peut noter que le stylobate et les parements de la tour du Chaudron sont globalement plus altérés à partir de la travée n°5 que sur les quatre premières travées. Ceci s'explique notamment par le fait que ces premières travées ont été restaurées récemment en raison de leur plus grande visibilité et accessibilité au public.

Ces desquamations en plaques affectent ponctuellement une pierre au niveau de l'aile Sud, alors qu'elle peut s'étendre sur un ensemble de pierres sur la tour du Chaudron. L'épaisseur des plaques varie peu, de 9 à 15 mm en moyenne. Dans certains cas qui ne concernent que la tour du Chaudron, la pierre se desquame en plusieurs plaques superposées, la première plaque étant tombée, une nouvelle plaque se forme à partir de la surface mise à nu précédemment.

2.2. ANALYSE STATISTIQUE DE LA RÉPARTITION DES ALTÉRATIONS

Comme dans le chapitre précédent, il est possible d'estimer les proportions de surface de pierres associées aux différentes cartographies d'altération. Ces pourcentages sont présentés à la Figure 58 et permettent de constater que près de 50 % des parements de la tour du Chaudron sont recouverts d'une altération, quelle qu'elle soit. Alors que pour l'aile Sud, moins de 15 % du parement est altéré.

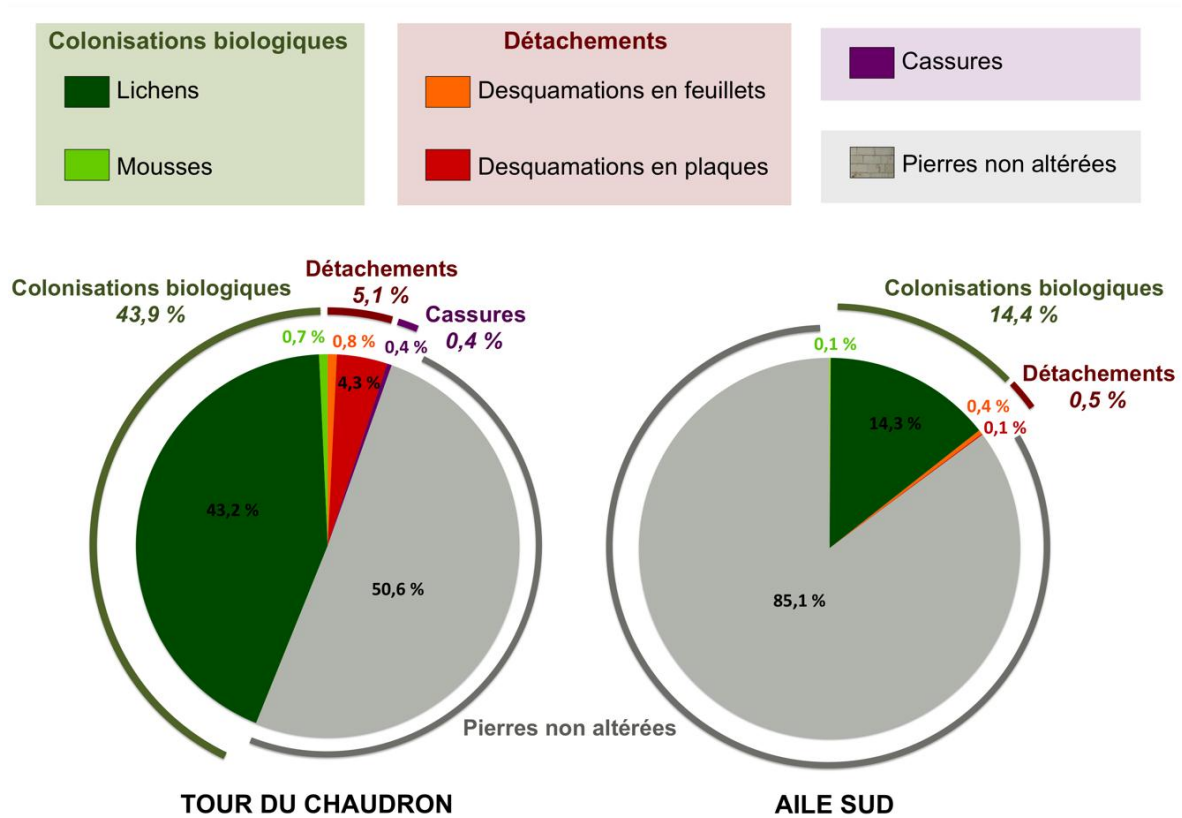


FIGURE 58 : PROPORTION DE SURFACE DE FAÇADE ALTÉRÉE SELON CHAQUE TYPE D'ALTÉRATION

Nous avons vu que la localisation des altérations dépend d'un certain nombre de facteurs environnementaux et architecturaux, mais pas uniquement. Lorsque l'on superpose ces cartographies d'altérations aux cartographies de nature des pierres, présentées dans le chapitre précédent, il est possible de savoir sur quel substrat se développent préférentiellement ces altérations.

Le Tableau 1 et le Tableau 2 montrent cette proportion des différentes altérations en fonction des natures de pierres de la façade, respectivement pour la tour du Chaudron et pour l'aile Sud. Pour un pourcentage donné d'altération, on calcule le pourcentage concerné pour chacune des trois natures principales de pierres : les tuffeaux, les calcaires fins autres que le tuffeau, et les calcaires lacustres. Ainsi, pour les lichens qui affectent 43,2 % des parements de la tour du Chaudron, 8,5 % de ces 43,2 % touchent les calcaires lacustres, 43,8 % les calcaires fins, et 47,7 % concernent les tuffeaux.

	Colonisations biologiques		Détachements		Cassures
	Lichens	Mousses	Feuillets	Plaques	
Tuffeau	47,7 %	45,9 %	97,4 %	100 %	100 %
Calcaire fin	43,8 %	11,6 %	2,6 %	0 %	0 %
Calcaire lacustre	8,5 %	42,5 %	0 %	0 %	0 %

TABLEAU 1 : PROPORTION DES DIFFERENTES ALTERATIONS DE LA TOUR DU CHAUDRON ASSOCIEE A CHAQUE NATURE DE PIERRES

	Colonisations biologiques		Détachements	
	Lichens	Mousses	Feuillets	Plaques
Tuffeau	6,6 %	0 %	58,7 %	100 %
Calcaire fin	81,5 %	100 %	41,3 %	0 %
Calcaire lacustre	11,9 %	0 %	0 %	0 %

TABLEAU 2 : PROPORTION DES DIFFERENTES ALTERATIONS DE L'AILE SUD ASSOCIEE A CHAQUE NATURE DE PIERRES

Enfin, le Tableau 3 montre de manière générale le pourcentage de zone altérée et le pourcentage de zone saine pour chacune des natures de pierre, ce qui permet de mettre en évidence les pierres les plus sujettes aux altérations indépendamment des dates des poses des pierres. La différenciation entre les altérations dues aux colonisations biologiques et celles dues aux détachements et cassures permet de mettre en évidence le fait que les calcaires fins, principalement de la pierre de Richemont, ne sont que très peu concernés par les détachements et les cassures, les desquamations étant même inexistantes pour les calcaires lacustres.

		Tuffeau	Calcaire fin	Calcaire lacustre
Tour du Chaudron	Zone avec colonisations biologiques	8,1 %	94,8 %	31,3 %
	Zone avec détachements et cassures	31,1 %	0,1 %	0 %
	Zone saine	60,8 %	5,1 %	68,7 %
Aile Sud	Zone avec colonisations biologiques	2,3 %	24,8 %	14,7 %
	Zone avec détachements et cassures	0,7	0,4 %	0 %
	Zone saine	97 %	74,8 %	85,3 %

TABLEAU 3 : POURCENTAGE DE SURFACE SAINE ASSOCIEE A CHAQUE NATURE DE PIERRES

3. CONCLUSION

Les altérations biologiques sont dominantes sur ces façades. Les lichens recouvrent 43,2% de la tour du Chaudron et 14,3 % de l'aile Sud. Les mousses en revanche, sont beaucoup plus ponctuelles et concernent moins d'1 % des façades. Le développement des lichens est surtout fonction du relief et de l'orientation, et semble totalement indépendant de la nature des pierres en place, puisqu'il touche indifféremment l'ensemble des parements. Le développement des mousses semble également indépendant des matériaux sur lesquels elles reposent. On note toutefois que sur l'aile Sud, les mousses ne sont présentes que sur les calcaires fins. Rappelons que sur cette façade, les mousses ne représentent que 0,1 % des surfaces altérées, et qu'elles se développent exclusivement sur les reliefs. L'étude du chapitre précédent a montré que l'essentiel des reliefs de l'aile Sud a été remplacé en calcaire fin autre que le tuffeau entre 1937 et 1964, principalement en pierre de Richemont. De plus l'orientation de la façade, exposée au Sud-Est, limite fortement le développement des colonisations biologiques, ce qui explique qu'elles occupent une moindre place sur cette façade que sur les travées de la tour du Chaudron.

Les cassures au niveau de reliefs ne concernent que la tour du Chaudron, dans une très faible proportion de 0,4 %. Ces cassures sont encore présentes sur la tour car elle a été moins restaurée que l'aile Sud, alors que pour cette dernière, les pierres affectées par des cassures ont toutes été remplacées. Ces cassures sur la tour se situent uniquement au niveau des pierres de tuffeau, mais pourraient concerner d'autres natures de pierres. La tour ayant très peu été restaurée, les reliefs sont presque exclusivement en tuffeau, ce qui explique pourquoi c'est cette pierre qui est la première concernée. A cela s'ajoute la fragilité du tuffeau en comparaison des autres pierres calcaires, et le fait que les quelques reliefs remplacés en pierre de Richemont ou autres calcaires fins plus durs, ne l'ont été que très récemment, ce qui limite la probabilité d'une altération de ce type.

Enfin, concernant les détachements de matière par desquamation, qui ont été définis précédemment comme les plus dommageables et irréversibles, c'est, là encore, sur la tour du Chaudron qu'ils sont les plus nombreux. Cette altération représente 5,1 % des parements de la tour, avec une majorité de desquamations en plaques, et 0,5 % de l'aile Sud avec une majorité de desquamation en feuillets cette fois. Les calcaires lacustres sont totalement exempts de ce type d'altération, leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques étant

à l'origine de cette meilleure résistance à l'altération (voir annexe 3.2 sur les caractéristiques des pierres employées). Les desquamations en feuillets peuvent toucher à la fois les tuffeaux et les calcaires plus durs comme la pierre de Richemont, et sont surtout fonction de l'orientation. Les desquamations en plaques, en revanche, touchent exclusivement les tuffeaux, de mêmes que les fissures, dont on a évoqué le lien possible avec les desquamations en plaques.

Le Tableau 3 montre que, de manière générale, l'altération des tuffeaux et des calcaires fins est plus importante que celle des calcaires lacustres et dépend de leur usage en parement lisse ou au niveau de reliefs, et de leur orientation. Les calcaires fins sont les pierres les plus altérées du bâtiment. Sur la tour du Chaudron, ces calcaires sont d'ailleurs presque entièrement recouverts d'altérations, biologiques pour la plupart. Ceci est dû au fait que les pierres de cette nature ont généralement été posées en remplacement de pierres altérées en reliefs saillants, au niveau du stylobate ou des corniches, ainsi qu'en partie haute au niveau de la balustrade. Or, nous avons vu que ces zones sont plus exposées aux aléas climatiques et donc plus sensibles aux altérations qui en découlent.

CHAPITRE 4

TEMPORALITÉ ET ESTIMATION DE L'ÉVOLUTION DES ALTÉRATIONS

Globalement, la tour du Chaudron présente trois fois plus de surfaces altérées que l'aile Sud. Cette différence peut être expliquée par le fait que l'aile Sud, accessible et visible par le public, a été plus largement restaurée et entretenue que la tour du Chaudron, plus à l'écart. En effet, l'environnement et l'orientation des façades, la disposition des pierres sur le bâtiment (reliefs, murs droits) et la nature de ces pierres sont des paramètres qui influencent l'installation et le développement des altérations. La corrélation statistique des différentes cartographies nous a fourni des éléments clés pour identifier les facteurs statistiquement associés à la formation des différentes altérations. Il reste néanmoins un point majeur qui ne peut pas être abordé par cette seule approche : la notion de cinétique d'altération, la notion de temps, i.e. le temps mis par une altération pour s'installer et pour se développer. L'étude historique menée précédemment, bien que lacunaire, fournit de précieux repères temporels associés à des représentations des façades.

Si certaines études s'attachent à la description des altérations, ou à des hypothèses quant à leur cinétique, rares sont celles qui prennent en compte des données historiques précises et qui s'attachent à la quantification de l'aspect temporel. Ce travail permet donc d'estimer des dates ou au moins des bornes de date d'apparition d'altérations, de donner des ordres de grandeur de temps de développement propres au contexte de Chambord. Cette partie du chapitre s'intéresse à l'ensemble du château, les informations concernant uniquement la tour du Chaudron ou l'aile Sud étant quasiment inexistantes. L'élargissement de cette étude conduirait à présenter des scénarii d'évolution de ces altérations, et à faire des propositions de priorisation de restauration.

1. LES ALTERATIONS A CHAMBORD JUSQU'EN 1900, D'APRES LES TEXTES ET LES GRAVURES

Dans le cas du château de Chambord, pour les périodes les plus anciennes, on bénéficie de textes descriptifs. Qu'ils soient littéraires ou à des fins de réalisation de travaux, les citations sont succinctes mais prouvent que les problèmes d'altération de la pierre ont toujours existé. À cela s'ajoutent des gravures plus ou moins réalistes, illustrant parfois l'état de dégradation dans lequel se trouve le château. Ces textes et gravures datant d'avant 1900 seront analysés pour en extraire une chronologie des différentes restaurations en lien avec l'état d'altération du monument.

1.1. CHRONOLOGIE

1.1.1. TRAVAUX JUSQU'À LA FIN DU XVII^E SIÈCLE

À la mort de François I^{er} en 1547, le château reste inachevé, et son état est examiné et décrit en 1566 par le secrétaire d'Etat Florimond II Robertet, à la demande de Catherine de Médicis, veuve d'Henri II et mère de Charles IX¹⁰⁸. Le texte mentionne que « l'eau passe à travers les terrasses et gaste et pourryst ces quatre belles voustes des salles en plusieurs endroitz » : à peine vingt ans après les derniers travaux effectués sous François I^{er}, des dégradations sont déjà à noter.

Il semblerait que les travaux n'aient pas été réalisés puisqu'un devis du 1^{er} mai 1641, demandé par le Duc d'Orléans, mentionne que les voûtes et plafonds de ces salles sont toujours « ruinez, pourris et rompus par les eaux et geles »¹⁰⁹. Ce devis est relativement détaillé au niveau de l'état de détérioration du château et des travaux qu'il convient de faire pour le remettre en état ou du moins éviter une dégradation plus importante. Les descriptions et les adjectifs employés sont cependant déroutants, peu précis, redondants, et il est difficile d'y reconnaître des altérations comme décrites plus haut dans ce chapitre. Les restaurations préconisées n'ont en outre probablement pas non plus été réalisées dans leur intégralité.

¹⁰⁸ Lettre et rapport du secrétaire d'Etat Florimond II Robertet à Catherine de Médicis en 1566

¹⁰⁹ Archives Départementales du Loir-et-Cher, 3 E 27/280, devis de travaux de maçonnerie aux 8 grosses tours du château de Chambord, 1^{er} mai 1641, Me Lavie

Claude Perrault visite le château de Chambord et l'évoque dans son « *Voyage à Bordeaux* » en 1669. Il évoque cependant plus son architecture, dont il déplore l'asymétrie, que son état de conservation. Quelques années plus tard, avant d'entreprendre des travaux à Chambord, Louis XIV en fait dresser un état. Celui-ci est jugé « en un estat pitoyable (...) il pleuvoit partout » par Colbert dans une lettre du 4 octobre 1679. La description qu'en fait André Félibien en 1681 est moins alarmiste, il trouve que « les bastimens du roy sont entretenus avec beaucoup plus de soin qu'on ne faisoit autrefois ». Selon lui, le bâtiment n'est pas dans l'état de ruine que montrent les descriptions antérieures : « Dans tout le bastiment, il y a de toutes ces sortes de pierres indifféremment employées, les unes parmy les autres et assez mal appareillées. Cependant, rien ne se déjoint, et l'on ne s'est point servi de fer pour aucunes liaisons. Il y en a seulement qu'on a esté obligé de mettre longtemps après que le bastiment a esté fait à cause des pluyes et des mauvais temps qui ont ruiné quelques pierres. Pour le mortier dont l'on s'est servi, il se trouve de bonne nature aussy, à l'exception de quelques endroits que les eaux ont gastez. Toutes les pierres et la maçonnerie sont bien conservées ». Il y a probablement du vrai dans les dires de Félibien, car même encore aujourd'hui, une partie des maçonneries en place est très bien conservée.

Les 10 et 12 mai et le 13 août 1681, trois marchés prévoient des travaux de restauration commençant par un nettoyage du château pour le débarrasser de la végétation qui l'envahissait, montrant que Félibien avait sans doute exagéré le bon état du château (Martin-Demézil, 1986). C'est la première mention de colonisations biologiques que l'on peut noter, il a fallu : « nettoyer et arracher toutes les herbes, arbrisseaux, lierres et racines qui sont sur et au long des murs, dedans et au pourtour des bâtiments qui ne sont pas achevés ». Outre des développements biologiques, la base des murs jusqu'au stylobate semblait envahie de déchets variés, pouvant peut-être être à l'origine de cassures sur ces reliefs, ou de sources de pollution de la pierre. On parle de « nettoyer les immondices et gravois qui sont sur les bases et corniches des piédestaux du rez-de-chaussée, tant du côté de la cour que sur les fausses-brayes ». On sait que l'essentiel des dépenses allouées aux restaurations du château sous Louis XIV le furent pour la maçonnerie, ce qui semble impliquer des désordres graves. Aucune description des altérations en elles-mêmes n'est faite en dehors de l'adjectif « ruiné », mais des devis de 1684 et 1685 mentionnent le type de restaurations subies par les maçonneries des tours du donjon et de la chapelle (Penet, 1963). Il semblerait que les désordres soient de nature structurelle (consolidation des plates-bandes des fenêtres par des barres de fer), ainsi qu'à l'échelle de la pierre elle-même (démolition et reconstruction d'entablements, corniches, balustrades, gargouilles, remplacement de pierres des parements) ou du mortier qui l'entoure

(rejointoiement). À l'inverse des devis précédemment cités, ceux-ci ont bien été réalisés, permettant ainsi de ralentir considérablement la dégradation du château, puisque toutes les parties inachevées reçurent une couverture, les isolant ainsi des aléas climatiques.

La construction des mansardes par Louis XIV a incontestablement permis de préserver une partie de l'enceinte basse du château d'une ruine rapide. En effet, à la mort de François I^{er}, la construction a été arrêtée, et les communs n'étaient pas encore couverts de toitures ou de terrasses. Ces parties étant moins prestigieuses, si Louis XIV ne les avait pas rendues utilisables et agrandies pour loger les domestiques dans les mansardes, probablement que l'aile Sud, la tour du Chaudron, l'aile et la tour des Princes, auraient subi le même sort que les communs d'Orléans, laissés à l'abandon pendant des siècles, sans couverture, les murs béants et l'espace envahi de végétation. Il ne resterait aujourd'hui de l'aile Sud et de la tour du Chaudron que très peu de pierres d'origine.

1.1.2. RESTAURATIONS À PARTIR DU XVIII^E SIÈCLE

Par la suite, les mentions de l'état du château au XVIII^e siècle sont rares, de même que les opérations de restauration ou d'entretien, dont peu ont pu être répertoriées dans cette étude. En 1820, la commission responsable de la souscription nationale visant à offrir le château au Duc de Bordeaux le décrit comme étant « dans un état indescriptible de destruction et de ruine », évoquant là encore des « baies béantes » et des « couvertures privées d'entretien (...) laissant pénétrer abondamment la neige et la pluie à l'intérieur ». En 1842, deux ans après que le château a été classé aux Monuments Historiques, celui-ci est déclaré en très bon état dans les procès-verbaux et relevés d'architectes réalisés par la Commission des Monuments Historiques. On sait toutefois qu'il n'en est rien, puisque Victor Hugo et Gustave Flaubert, qui le visitent respectivement en 1825 et 1847, le décrivent comme non entretenu et ouvert aux intempéries (Chatenet, 2001). Dans une lettre à son ami, Victor Hugo dit avoir « emporté un peu de mousse »¹¹⁰. Malgré son admiration pour le monument, sa description dans son pamphlet « *Guerre aux démolisseurs* »¹¹¹ est alarmante : « Il chancelle, déjà miné par les eaux du ciel qui ont filtré à travers la pierre tendre de ses toits dégarnis de plomb. Nous le déclarons avec douleur, si l'on n'y songe promptement (...) bien peu de choses restera debout de cet édifice ». Flaubert, quelques années plus tard, ne cache pas sa déception lorsqu'il visite

¹¹⁰ Victor Hugo, Lettre à Adolphe De Saint-Valry, Blois, 7 mai 1825

¹¹¹ Victor Hugo, *Guerre aux démolisseurs*, 1825

Chambord¹¹² : « Quand nous sommes entrés, l'eau coulait sur les toits et passait pas les fenêtres brisées ».

Des gravures réalisées à cette même période montrent le château dans un état semblable (Figure 59). Bien que probablement représentatives de l'état du château, à l'abandon et envahi de végétation, ces gravures sont à considérer avec précaution : l'esthétique de la ruine est un thème courant durant cette époque romantique, et la représentation artistique prime sur la justesse scientifique. Sur le dessin mis en scène de Nicolas Chapuy, outre la végétation qui se développe dans la cour et les fissures représentées sur les colonnes de l'escalier, les altérations que l'on voit sur les pierres des piliers sont-elles dues à des colonisations biologiques, des desquamations, ou des efflorescences salines ? La gravure d'Eugène Viollet-le-Duc, architecte restaurateur, s'attache plus à illustrer de manière scientifique l'état des parements, que l'on pourrait qualifier de « rongés » ou « désagrégés ». Les parties basses des colonnes sur son dessin sont-elles le résultat de cassures mécaniques ou anthropiques, ou bien de desquamations de la pierre ? À la seule vue de ces gravures, pourtant précises dans leur exécution, il n'est pas possible de se prononcer sur la nature des altérations dessinées, mais le qualificatif de desquamation semble *a priori* inadapté.

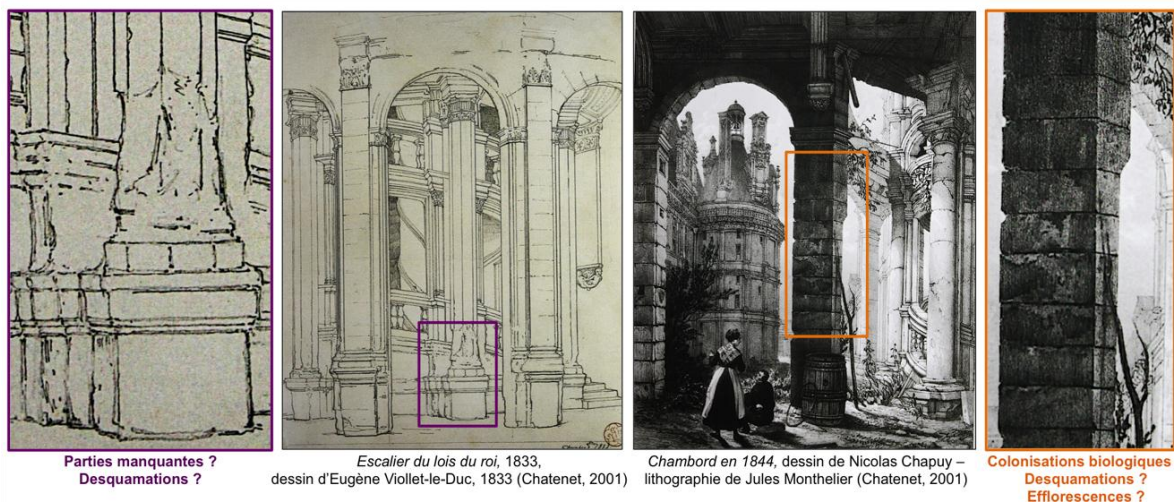


FIGURE 59 : GRAVURES REALISEES AU XIX^E SIECLE

De plus, ces gravures représentent bien souvent les parties les plus ouvragées du château, et si des altérations y figurent, elles sont principalement au niveau des reliefs. Il a été vu plus haut que les reliefs sont généralement plus sujets aux altérations par détachement ou perte de matière, que les parties droites des murs. Dans les représentations de la Figure 59, les murs droits ne sont pas représentés. Lorsque ceux-ci sont représentés dans d'autres gravures, le

¹¹² Gustave Flaubert et Maxime Du Camp, *Par les champs et par les grèves*, publication posthume 1885

niveau de détail n'est pas suffisant pour apporter des informations. Nous n'avons donc qu'une vision partielle des phénomènes de dégradation pouvant affecter le château à cette époque.

Les Desbois, père et fils, sont à l'origine des plus importantes restaurations entreprises à Chambord, au XIX^e siècle. Les nettoyages habituels ont été suivis par de nombreuses consolidations structurelles, ainsi que par des remplacements de pierres. Les planches illustratives des Desbois ne sont que des restitutions ou représentations de sculptures ou éléments architecturaux, le but n'est pas de représenter de manière réaliste l'état de détérioration avant restauration, mais plutôt de préciser la structure et le mode de construction, pour permettre la restauration à l'identique. La description de l'état d'altération, qu'ils font dans leur *Notice* en 1894, est assez succincte, les termes employés les plus marquants ont été répertoriés dans le Tableau 4.

1.2. DEDUCTIONS

Le Tableau 4 regroupe les différents adjectifs utilisés dans les textes cités pour qualifier l'état d'altération. La localisation de ces altérations et les causes qui leur sont imputées figurent également dans ce tableau.

Date et source	Localisation de l'altération	Qualificatif de l'altération	Cause citée
1566 Lettre de Robertet	Voûte des salles du donjon	gaste pourryst	eaue
1 ^{er} mai 1641 Devis demandé par le Duc d'Orléans	Voûtes des salles du donjon et terrasses	ruinez pourris rompus vitiés	eau gelées
4 Octobre 1679 Lettre de Colbert	Généralités	Etat pitoyable Il pleuvoit partout	eau
1681 Rapport de Félibien	Généralités	ruiné gastez	pluyes mauvais temps eau
1681, 1684 et 1685 Devis demandés par Hardouin-Mansart	Murs maçonnés	ruiné	-
Travaux de restauration des Desbois de 1882 à 1894	1882 Murs de la cour (le niveau du sol atteint le stylobate)	larges tâches verdâtres	humidité excessive du sol
	1889 Souches de cheminées	mauvais état périlleux	-
	1890 Lanterne	chute de pierre dislocation effrayante et totale des pierres	oxydation des éléments en fer cerclant la pierre, entraînant un éclatement
	1893 partie basse de la lanterne (balustrades, corniches)	avaries avariées	eau de pluie
	1893 plafond de la lanterne	pulvérulent poussière	eau de pluie

TABEAU 4 : TABLEAU RECAPITULATIF DU VOCABULAIRE EMPLOYE POUR DEFINIR LES ALTERATIONS DANS LES DIFFERENTS TEXTES CONSULTES

De manière générale, dans les textes, il est souvent fait mention des altérations des parties hautes et extérieures du donjon, ainsi que des plafonds à caissons du dernier étage du donjon. La raison principale est un problème d'étanchéité des toitures, de baies ouvertes ou sans vitres, et de fuites provenant des terrasses du donjon, en tuffeau, l'eau filtrant à travers.

L'eau est en effet le premier facteur d'altération citée dans les textes. Par extension, l'humidité et le gel sont aussi des causes évoquées. La rouille des cerclages en fer posés pour consolider des structures par endroits (et dont Félibien cite la présence au XVII^e siècle), est mentionnée comme étant la cause d'éclatements de la pierre, mais c'est ici la seule source d'altération non directement climatique qui soit citée.

Enfin, si l'on s'intéresse au vocabulaire employé pour qualifier les altérations, on remarquera que les termes restent vagues. Ils évoquent une détérioration de la pierre, certes, mais la description s'apparente plus à un constat général qu'à une qualification précise de

l'altération. Le terme « ruiné » revient le plus fréquemment... qu'entendent les auteurs par ce qualificatif ? Il n'est pas possible, d'après ces descriptions, d'y reconnaître précisément les altérations décrites plus haut dans ce chapitre. Les termes « plaques », « feuillets », employés aujourd'hui, sont imagés, parlants, et même assez instinctifs lorsque l'on est confronté à une pareille altération. Pourquoi aucun terme semblable n'est-il employé par le passé ? Est-ce parce que la pierre n'était pas altérée sous cette forme ? Ou bien est-ce parce que les constats d'état qui ont été recensés ici sont simplement trop généraux pour que les formes d'altérations soient décrites en détail ?

Les seuls termes précis, plus proches des descriptions actuelles, ont été relevés dans la *notice* des Desbois : « poussière » et « pulvérulent ». Aucune plaque ou desquamation en général (étape précédant la pulvérulence) n'est notée. On peut donc se demander si les desquamations en plaques existaient à ces dates. À l'instar de la pulvérulence, la forme que prend une desquamation est probablement suffisamment alarmante et imagée pour que les Desbois la mentionnent dans leur *notice* s'ils l'avaient rencontrée.

Pour finir, les altérations biologiques ne sont que peu évoquées. Les gravures et certains textes montrent que la végétation envahissait pourtant la cour et les reliefs, et il est probable que du lichen et des mousses se soient développés dès le XVI^e siècle. Hugo évoque les mousses, sans y ajouter une connotation négative. Il est probable que les colonisations biologiques, bien qu'elles contribuent à l'impression de ruine du château, ne soient pas considérées comme une altération à part entière, sans doute par leur aspect réversible, dont le nettoyage est possible. C'est seulement dans la *Notice* des Desbois que les colonisations biologiques sont décrites comme une altération de la pierre, avec une description précise et une cause identifiée.

Les altérations biologiques, bien que peu souvent abordées, ont sans doute toujours été présentes sous diverses formes, alors que l'absence de description de détachement de pierre par desquamation révèle peut-être une absence de cette forme d'altération aux époques évoquées. Ce travail est une première approche. Il serait intéressant de coupler ces descriptions anciennes avec celles faites à différentes époques pour d'autres édifices en tuffeau de la région.

2. LES ALTERATIONS A CHAMBORD A PARTIR DU XX^E SIECLE, D'APRES LES PHOTOGRAPHIES ET LES OBSERVATIONS

Les quelques photographies anciennes du XIX^e siècle ne sont généralement que des vues d'ensemble, destinées à des cartes postales ou d'autres fins touristiques, et sont donc trop imprécises pour servir de support pertinent. En revanche, à partir du début du XX^e siècle et notamment des années 1930, les photographies illustrant les travaux de restauration se généralisent. Les constats d'état avant restauration et les rapports de restaurations sont également plus précis qu'auparavant, mais pour ces travaux du XX^e siècle, les photographies sont bien souvent plus parlantes, et c'est pourquoi elles serviront préférentiellement à illustrer le propos. À cela s'ajoutent les informations tirées des croisements entre les cartographies de datation des pierres et les relevés d'altération réalisés aux chapitres 2 et 3 de ce manuscrit. L'objectif est d'estimer la date d'apparition des altérations, ainsi que la progression temporelle de la surface altérée. C'est donc grâce à ces données historiques que seront proposées les premières hypothèses visant à estimer les dates d'apparition des différents faciès d'altération et leur cinétique de progression.

2.1. APPORT DE LA PHOTOGRAPHIE

Les altérations décrites dans les textes, bien que vagues, évoquent une pierre érodée, rongée, dont l'infiltration d'eau est la principale cause. Certaines photographies¹¹³ montrent un état de la pierre assez semblable à ces qualificatifs, comme par exemple sur la Figure 60 représentant le Portail Royal en 1947 avant les restaurations de 1962. Cette altération est la conséquence d'un problème d'étanchéité des terrasses construites en 1937, l'accumulation d'eau au niveau des parements ayant entraîné l'altération très rapide des pierres en moins de dix ans. En effet, tous les volumes sont érodés, usés, au niveau de la tâche d'humidité. Ce type d'altération est semblable aux pierres autour de la baie n°16 de l'aile Sud dont l'altération a pour origine une fuite des canalisations situées derrière cette baie. Ces altérations résultent de perturbations ponctuelles, d'accidents, et ne dépendent pas de l'environnement climatique habituel de la pierre.

¹¹³ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, cliché M. Ranjard 2047

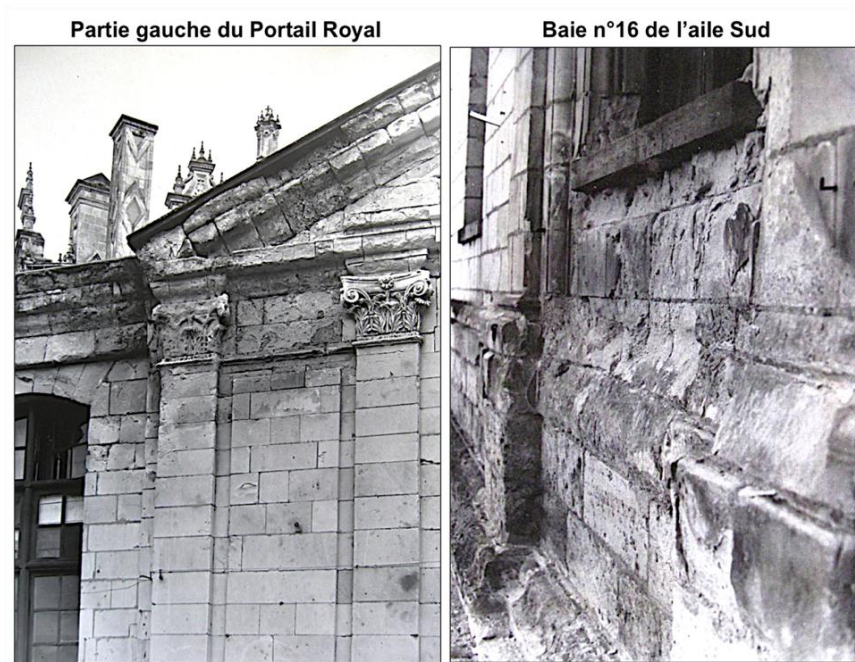


FIGURE 60 : PHOTOGRAPHIES DE L'AILE SUD DATANT DE 1947 (CLICHES M. RANJARD, 1947)

Cette forme d'altération est également semblable à celles observées sur les pierres déposées au musée lapidaire du château de Chambord par les Desbois lors de leurs travaux de restauration, ou encore bon nombre de pierres photographiées en 1947 qui ont été remplacées depuis¹¹⁴ (Figure 61).

La cause de ces altérations est probablement environnementale, cette fois, mais on peut observer cette même impression d'érosion de la surface, qui serait la conséquence d'une dissolution de la pierre (Jeannette, 1992). Cette forme d'altération n'est plus très visible aujourd'hui, car les importants travaux des Desbois à la fin du XIX^e siècle et les grandes campagnes de restaurations qui ont eu lieu après la seconde guerre mondiale ont achevé de remplacer ces parements altérés par des pierres neuves.

¹¹⁴ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, cliché M. Ranjard 2047



FIGURE 61 : PHOTOGRAPHIES DE FORMES D'ALTERATION DISPARUES

Pour les autres formes d'altérations recensées aujourd'hui, une tentative de chronologie de leur développement peut être faite.

Pour les pierres d'origine, il n'est pas possible de définir le temps qu'elles ont mis à s'altérer, car on ne possède au mieux que des images d'un état après près de quatre siècles d'existence du château. C'est donc sur les parties remplacées au XX^e siècle que l'on pourra estimer plus précisément le temps de développement d'une altération. À partir de cette époque, l'utilisation de la photographie se généralise, et les photographies de détails sont plus nombreuses qu'auparavant, permettant ainsi une analyse plus aisée de l'état d'altération du château au cours du temps.

Les photographies d'une même zone prises à différentes dates permettent d'approcher la date d'apparition d'une altération. Les cartographies de datations réalisées et présentées au chapitre 2, confrontées aux relevés d'altération, permettent également de mieux cerner le temps mis par une altération pour se développer, en observant par exemple le degré d'altération différentiel entre deux pierres posées à deux dates différentes connues. Enfin, les photographies d'une même zone d'altération, prises à différentes dates et donc différents stades d'évolution de cette altération, confrontées à des images de thermographie infrarouge, permettent d'évaluer l'évolution future d'une altération, en mettant en évidence les zones à risque.

2.2. COLONISATIONS BIOLOGIQUES

Dans les années 1930, Pierre Paquet réalise un rapport de l'état du château dont les mansardes vont être démolies. Ses descriptions de l'état d'altération sont tout aussi vagues que dans les textes des époques précédentes : il n'emploie que l'adjectif « ruiné ». En revanche, pour cette période plus récente, il existe des photographies, parfois suffisamment détaillées pour permettre d'observer cet état de délabrement. On constate notamment que les corniches de l'aile Sud qui vont être restaurées sont couvertes de lichens très sombres, qui contrastent ensuite d'ailleurs beaucoup avec les pierres qui seront ajoutées, beaucoup plus blanches (voir Figure 25 du Chapitre 2).

Mais pour pouvoir estimer le temps mis par une altération pour se développer, il faut pouvoir comparer deux photographies d'une même zone. Ainsi, des photographies de l'aile Sud ont été prises en 1947 par l'architecte Michel Ranjard qui prévoyait déjà de faire restaurer ces façades. Les pierres remplacées en 1937, dont la blancheur contrastait avec les pierres anciennes laissées en place, sont déjà couvertes de lichens en partie supérieure dix ans après avoir été posées. Mais les lichens peuvent parfois mettre moins de temps à se développer.

En effet, entre 1962 et 1964, les pierres altérées qui étaient restées en place au niveau des corniches de l'aile Sud ont été remplacées. Des images datant de 1967 prouvent qu'à peine trois ans plus tard, la partie supérieure de ces corniches était déjà recouverte de lichens, de même que la main courante de la balustrade. Il s'agit d'images filmées lors de la réalisation de *Peau d'âne* par Jacques Demy, dont les dernières scènes sont tournées devant l'aile Sud, récemment restaurée. Ces images montrent le stylobate, remplacé aux mêmes dates, déjà recouvert de lichens lui aussi.

Également sur des reliefs horizontaux, on sait que le stylobate de la deuxième travée de la tour du Chaudron a été remplacé en 1994. Les photographies prises en 1998 par Céline Thomachot montrent ce stylobate quatre ans plus tard déjà recouvert de lichens, dans un état presque comparable à celui dans lequel il est aujourd'hui (Figure 62).



FIGURE 62 : TRAVÉE N°2 DE LA TOUR DU CHAUDRON RESTAURÉE EN 1994. COMPARAISON DES ETATS DE 1998 ET 2012

Tous ces exemples concernent des remplacements récents en pierre de Richemont. Mais le développement des lichens est aussi rapide et occupe le même espace sur des reliefs en tuffeau, comme l'attestent le stylobate des deux dernières travées de la tour du Chaudron, contigües à l'aile des communs d'Orléans, remplacé à une date incertaine, probablement autour de 1970.

Cependant, les lichens ne se développent pas uniquement sur les reliefs horizontaux. En effet, selon l'orientation des travées, les conditions sont parfois favorables au développement de lichens sur des parois verticales. Ce développement est-il aussi rapide ? Sur la travée de la Figure 62, on remarque que les parements verticaux sont recouverts de lichens, à l'exception des pierres encadrant la baie, qui en sont totalement exemptes. Ces pierres ont été remplacées en 1994 comme le stylobate. En revanche, s'il a fallu moins de quatre ans aux lichens pour se développer sur les reliefs horizontaux, une quinzaine d'année ne suffisent pas pour que le lichen s'installe sur une paroi verticale, même si les conditions climatiques d'humidité et d'ensoleillement y sont favorables. Les parements verticaux remplacés en grande quantité ne sont pas les travaux de restauration les plus courants, les photographies montrant différents états du développement des lichens sur les parois verticales sont donc plus rares, à part cet

exemple de l'aile des communs d'Orléans, très restaurée dans les années 1970. Les parements verticaux extérieurs ne sont pas encore recouverts de lichens, mais il se peut qu'elles ne le soient jamais entièrement, puisque la façade est orientée de manière comparable aux travées n°8 et n°9 de la tour du Chaudron, qui sont exemptes de lichens en raison de leur exposition.

La pollution urbaine a généralement pour effet de ralentir la croissance des lichens (Caneva *et al.*, 1995 ; Del Monte et Sabbioni, 1986). Comme le château de Chambord a toujours été en contexte forestier, on peut envisager le fait que la cinétique de développement des lichens a toujours été la même depuis le XVI^e siècle, contrairement à de nombreux centres urbains.

Concernant les mousses qui se développent également sur les reliefs horizontaux, le temps mis pour leur développement est plus difficile à déterminer, car elles sont beaucoup moins nombreuses que les lichens, et ne sont donc pas discernables sur les photographies la plupart du temps. On en observe cependant quelques-unes sur les appuis de fenêtres de l'aile Sud remplacés entre 1962 et 1964, ainsi que sur le stylobate des deux dernières travées de la tour du Chaudron, remplacées dans les années 1970 environ. En revanche, aucune mousse n'a été identifiée sur le stylobate des premières travées de la tour, remplacé entre 1994 et 1999, alors que les conditions environnementales semblent favorables sur ces premières travées comme sur les dernières. Le temps de développement des mousses est donc compris entre 30 et 50 ans, bien plus lentement que pour les lichens.

Il n'y a pas de relation directe observable entre les colonisations biologiques et l'âge ou la nature des pierres. L'orientation des pierres semble jouer le principal rôle dans le développement de ce type d'altérations. Ces observations permettent enfin de mettre en évidence que les colonisations biologiques croissent vite, mais que leur développement ralentit ensuite, l'état de recouvrement des parements étant souvent comparable entre deux dates, une fois que l'altération est installée.

2.3. DESQUAMATIONS EN FEUILLETS

Concernant les détachements par desquamation en feuillets, aucune photographie n'a été trouvée pour aider à identifier la date d'apparition de cette altération, qui est de très petite taille. En effet, les photographies sont rarement prises de suffisamment près pour permettre de déceler des feuillets, qui en plus de cela se situent généralement dans des zones « cachées » lorsque la photographie est prise de front par rapport à la façade. En revanche, la confrontation entre les cartographies de datation des pierres (au chapitre 2) et les relevés d'altération (au chapitre 3) sont très utiles pour estimer une fourchette temporelle de développement de cette altération.

On sait qu'au niveau des parties sculptées arrondies et abritées des pluies, les desquamations en feuillets peuvent se développer sur différents types de calcaires à grains fins, qu'il s'agisse de tuffeaux ou d'autres pierres.

Pour la pierre de Richemont par exemple, la rapidité de développement dépend de la zone. Les balustrades installées sur l'aile Sud en 1964 présentent aujourd'hui toutes des desquamations en feuillets. En revanche, celles installées sur la tour du Chaudron en 1980 en sont quasiment exemptes. On en déduit qu'il faut moins de cinquante ans aux desquamations en feuillets pour se développer sur une pierre de Richemont neuve dans un environnement comme celui des balustrades. Si l'on transpose les dates de pose des balustrades de l'aile Sud, à celles de la tour du Chaudron, on peut penser qu'il y aura des desquamations en feuillets en aussi grande quantité, avant 2030, Du moins pour les balustrades de la tour qui ont la même orientation que celles de l'aile Sud, c'est à dire les travées n°4 et n°5, et éventuellement les n°11 et n°12.

Au niveau du stylobate remplacé en pierre de Richemont, les temps de développement semblent un peu plus lents. En effet, les pierres du stylobate remplacées entre 1962 et 1964 sur l'aile Sud ne possèdent pas encore de desquamations en feuillets, celles du stylobate des premières travées de la tour du Chaudron remplacées entre 1994 et 1999 non plus. Puisque la partie inférieure du stylobate semble très souvent sujette à ces altérations, on peut penser que d'ici quelques dizaines d'années il pourrait y avoir des desquamations en feuillets sur ces travées, mais aucune preuve matérielle ou photographique ne peut être apportée.

Toutefois, cette altération se développe beaucoup plus rapidement sur le tuffeau, puisque le stylobate remplacé dans les années 1970 sur les dernières travées de la tour du Chaudron présente déjà de nombreuses desquamations en feuillets en partie inférieure. Moins de

quarante ans sont donc nécessaires pour le développement de ces feuillets sur le tuffeau et dans des zones où les conditions sont réunies. Toutefois, la rapidité du développement sur ces travées ne dépend peut-être pas que du substrat, car leur position plus abritée que les travées de l'aile Sud favorise sans doute également cette altération.

On peut également se demander si cette altération a toujours existé ou bien si c'est un phénomène apparu récemment. On note la présence de desquamations en feuillets sur des pierres du dépôt lapidaire, déposées à la fin du XIX^e siècle. Deux hypothèses sont possibles :

- Les pierres ayant été entreposées dès leur dépose dans des pièces du château à l'environnement thermo-hydrique relativement stable, on peut supposer que cette forme d'altération était déjà présente il y a cent vingt ans au minimum
- C'est la dépose de ces pierres dans un nouvel environnement thermo-hydrique qui a contribué à la formation de cette altération il y a moins de cent vingt ans

Si le temps de développement d'une d'altération depuis la pose de la pierre peut parfois être cerné, en revanche, sa date d'apparition dans l'histoire du château est beaucoup plus difficile à identifier, notamment pour des altérations aussi « discrètes » que les desquamations en feuillets.

2.4. DESQUAMATIONS EN PLAQUES

2.4.1. DÉTECTION DE LA FISSURE ET MÉTHODES DE SURVEILLANCE

Dans un premier temps, il semble pertinent de surveiller les zones où un risque de desquamation est le plus important. Les reliefs et notamment les côtés des pilastres, souvent sujets au développement de fissures, et les tuffeaux juxtaposés à des pierres remplacées en pierre de Richemont sont les premières zones à suivre. L'essentiel de ces zones correspondent aux assises situées au-dessus du stylobate de l'aile Sud et des premières travées de la tour du Chaudron. Cette surveillance peut se faire par la détection des fissures par des tests non destructifs, complémentaires, tels que :

- L'observation visuelle pour localiser les éventuelles fissures.
- Le diagnostic sonore : un test non destructif consistant à toquer sur la pierre et à écouter la réponse sonore, ce qui revient à soumettre la surface à une impulsion

mécanique de type Dirac et à mesurer sa fréquence propre de résonance dans l'acoustique. Dans l'hypothèse où une fissure sous-jacente serait présente, plus la fissure est étendue et plus la fréquence est basse. Si aucune fissure n'est présente, le son produit est nettement plus aigu. Cette détection est difficile à réaliser systématiquement, car elle est limitée par l'accessibilité des pierres et la perception des sons.

- L'observation de discontinuités de propriétés thermiques par thermographie infrarouge, les images étant réalisées le matin, après les températures fraîches de la nuit et au cours du réchauffement des pierres par le soleil dans la matinée. Une zone fissurée fait apparaître une lame d'air qui joue le rôle d'isolant thermique. La plaque se réchauffe plus vite que le reste de la pierre car elle a plus de difficulté à transmettre sa chaleur, qui vient de son réchauffement en surface vers le cœur de la pierre, à cause de la fissure. Elle apparaît donc plus chaude qu'une zone homogène sans fissure où la chaleur venant de la surface peut se dissiper vers le cœur. L'usage de l'imagerie par caméra thermique peut être intéressant pour localiser une fissure non encore visible en surface, mais également pour prévoir l'évolution future d'une altération. Lorsqu'une partie de la pierre est desquamée, la zone de pierre autour de la desquamation, à première vue saine, est en fait déjà fissurée sous la surface. C'est cette zone fissurée qu'il est possible de visualiser, permettant ainsi d'évaluer son étendue. Cette méthode de détection, plus aisée à mettre en œuvre qu'un diagnostic sonore, ne peut cependant pas être réalisée dans n'importe quelles conditions climatiques, et est limitée par la présence d'artefacts thermiques tels que les mousses et les lichens, ou les vitres des fenêtres.

2.4.2. APPARITION DE LA PLAQUE

La desquamation en plaques est la seule altération recensée sur les façades, à ne toucher que les tuffeaux. C'est une altération dont les dates d'apparition sont également difficiles à cerner. En effet, l'altération commence par une fissure, sous la surface de la pierre, dont la présence n'est souvent pas décelable visuellement. À partir de la pose d'une pierre neuve, le temps mis par la fissure pour se créer sous la surface est une donnée qui n'a jamais été mesurée. De même, le temps mis par cette fissure pour être visible en surface en créant une plaque est difficilement mesurable. On peut toutefois essayer d'observer des phénomènes

d'apparition de plaques, en comparant des photographies d'une même zone prise à différentes époques.

Prenons l'exemple de la tour des Princes, à la Figure 63. Une photographie prise en 1947 par Michel Ranjard¹¹⁵ montre un parement d'origine intact, sans signe extérieur de plaque. Une photographie prise en 2003 (Beck, 2006) montre cette même zone atteinte par une desquamation en plaques dans un état avancé. Il n'est pas possible de savoir si la fissure était déjà présente avant 1947, ou bien si la fissure et la formation de la plaque datent toutes deux d'après 1947. On remarque cependant un élément important : une des pierres de cette zone a été remplacée, en calcaire de Richemont dans les années 1950¹¹⁶. Peut-être cette pierre commençait-elle déjà à s'altérer, ce qui expliquerait son remplacement, les autres pierres présentes autour de celle-ci étant déjà fissurées sous la surface mais sans desquamation visible. Il est pourrait également être envisagé que cette pierre ait été changée pour une toute autre raison, et que son installation ait déclenché ou accéléré la desquamation en plaques des pierres en tuffeau voisines, bien que la première hypothèse soit la plus probable. La photographie de 2003 comparée à l'état actuel montre qu'en une dizaine d'année, l'altération s'est légèrement étendue.

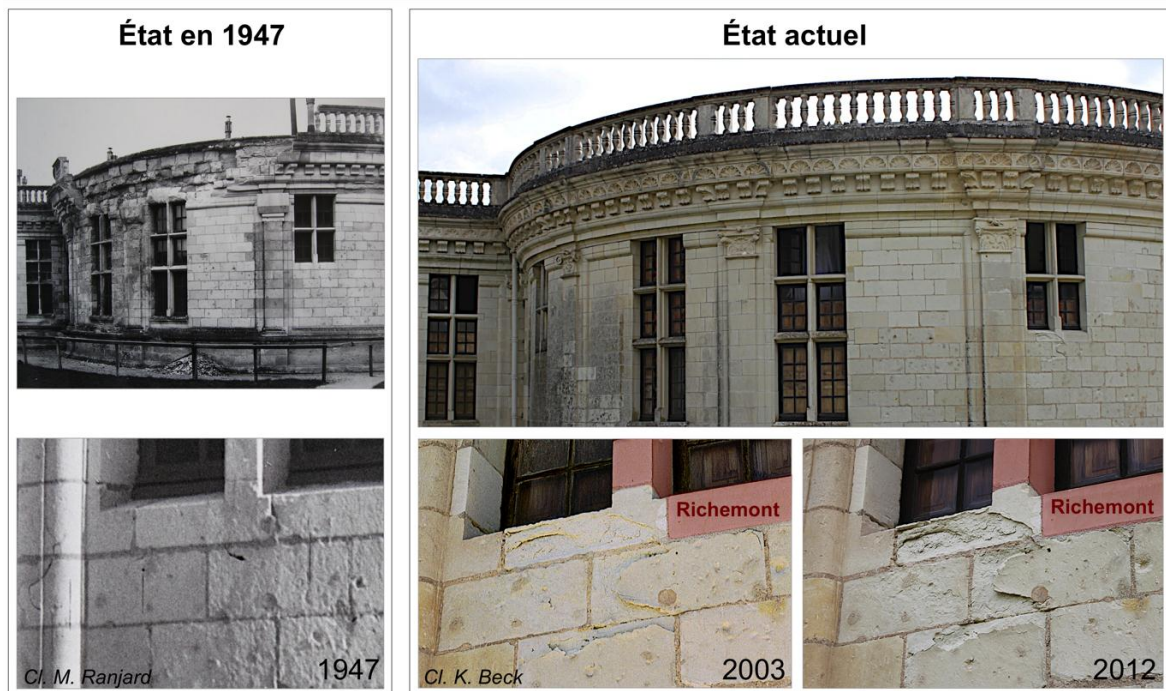


FIGURE 63 : DESQUAMATION EN PLAQUES SUR LA TOUR DES PRINCES

¹¹⁵ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/25, cliché M. Ranjard 2047

¹¹⁶ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/12

Un autre exemple significatif est celui de pierres de l'aile Sud (Figure 64). Une fuite d'eau avait eu lieu dans l'aile Sud, et la présence d'un dépôt de sacs de sels (il s'agirait de salpêtre) sur la paroi intérieure du mur est également connue, leur action conjointe ayant considérablement dégradé les parements extérieurs¹¹⁷. Une photographie de 1947 montre l'état de la travée, dont la pierre semble se desquamer et s'effriter le long de la zone atteinte par la fuite. Bon nombre de pierres ont donc ensuite été remplacées entre 1953 et 1955 sur la partie inférieure de la travée, notamment au niveau du stylobate et des deux assises supérieures. Comme pour la tour des Princes, c'est de la pierre de Richemont qui a été employée. Aujourd'hui, certains tuffeaux à côté des pierres remplacées présentent des desquamations en plaques. Il est peu probable qu'entre la date de la photographie (1947) et la date de remplacement des pierres (1953-55), la desquamation ait commencé à être visible, sinon en 1953-55, ces pierres auraient également été remplacées. C'est donc que cette desquamation est ultérieure à 1955. Les pierres de Richemont ne sont pas directement contigües aux tuffeaux desquamés, mais la question se pose tout de même de savoir si la pose de la pierre de Richemont a un rôle, et si c'est l'élément qui a déclenché la création de la fissure puis de la plaque, ou bien si une fissure était déjà préexistante avant la pose de la pierre de Richemont mais non encore visible en surface. L'état d'altération de la zone avant restauration suggère qu'il est possible qu'une fissure ou au moins une fragilisation ait déjà été présente dans ces pierres avant la pose des pierres de Richemont.



FIGURE 64 : DESQUAMATION EN PLAQUES SUR L'AILE SUD - FAÇADE SUR JARDIN

¹¹⁷ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, 0081/041/0115/15, rapport du 3 août 1953

2.4.3. OBSERVATIONS SUR LA CINÉTIQUE DE DÉVELOPPEMENT D'UNE PLAQUE

Côté cour de l'aile Sud, une desquamation en plaques atteignant un grand ensemble de pierres jointives a été observée (Figure 65). La comparaison de cette altération entre 2003 et 2012 montre que l'altération a progressé. Cette progression s'est faite uniquement vers le haut et latéralement, les pierres situées juste en dessous de cette altération étant en pierre de Richemont, posées entre 1962 et 1964. L'image en caméra thermique permet d'une part de mettre en évidence les pierres de Richemont, apparaissant plus froides que le tuffeau, et d'autre part de détecter l'étendue des fissures qui prolongent l'altération. Il est difficile de savoir en combien de temps cette partie de la pierre va se desquamer, mais si l'on se réfère à la vitesse d'évolution de la plaque entre 2003 et 2012, il est possible que cette zone fissurée soit entièrement desquamée dans dix ans et que la fissure se soit encore étendue dans toutes les directions, à l'exception du bas : les pierres de Richemont ne présentent aucune fissure et ne semblent pas concernées par le phénomène de desquamation.

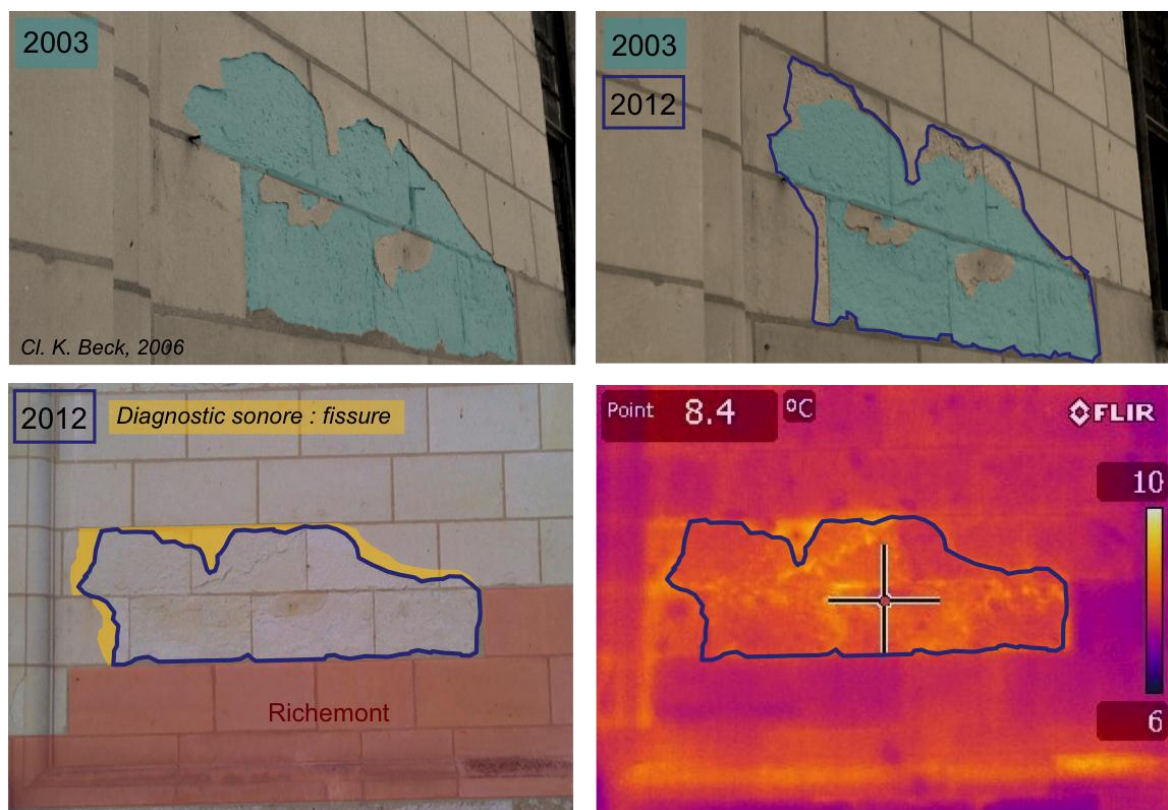


FIGURE 65 : DESQUAMATION EN PLAQUES SUR L'AILE SUD - FAÇADE SUR COUR

Toutefois, il semblerait que l'évolution d'une desquamation en plaques ne soit pas linéaire avec le temps. Une fois que la fissure est formée et que le premier morceau de plaque s'est détaché, la vitesse d'avancement de la fissure et de la chute de la plaque n'est pas constante. En effet, si dans le cas de la Figure 65 la plaque a évolué en dix ans, en revanche, ce n'est pas

le cas de la Figure 63, dont l'état a beaucoup plus stagné durant la même période. La chute de la plaque dépend vraisemblablement de facteurs extérieurs, comme des vents violents, une vibration de la paroi, une action anthropique, un gel violent, la pierre tombant sous son propre poids après un agrandissement brutal de la fissure, etc. La progression de la fissure ne semble pas non plus être régulière. En effet, sur la Figure 23, on voit qu'en 2003, la desquamation (et sans doute la fissure) vient s'arrêter le long des joints de mortiers (en bas à gauche), alors qu'en 2012, elle a dépassé ce joint de mortier. On peut donc imaginer que sur une pierre, l'altération peut progresser rapidement, alors qu'elle peut ralentir aux limites de la pierre, avant de s'étendre à d'autres pierres et d'accélérer de nouveau.

2.4.4. APPARITION OU DÉVELOPPEMENT DE LA FISSURE : IMPLICATION D'ÉLÉMENTS PERTURBATEURS ?

2.4.4.1. REMPLACEMENTS DE PIERRES

L'observation de la localisation des fissures a conduit à repérer une zone sensible : le Portail Royal. Entièrement remanié sous Louis XIV, les tuffeaux qui le composent datent de 1685. En 1962, il fut entièrement restauré, et presque la totalité des pierres altérées a été remplacée en pierre de Richemont. Seules quelques pierres du XVII^e siècle ont été laissées en place, sans doute celles qui ne présentaient pas de signes visibles d'altération. Aujourd'hui, ces tuffeaux présentent pour la plupart des fissures verticales sur les angles saillants, représentées symboliquement sur la Figure 66. Ces fissures, sans nul doute d'origine mécanique, sont probablement une conséquence des remplacements des pierres alentour en pierre de Richemont. De plus, on observe un départ de desquamation en plaques au niveau d'une pierre de tuffeau, isolée au milieu de pierres de Richemont. On pourrait se demander si c'est l'insertion de pierre de Richemont qui a conduit à la formation de la fissure puis de la desquamation sur cette pierre en tuffeau ou si un autre facteur entre en jeu, la pose de Richemont ayant été un élément aggravant. Cependant, comme pour la Figure 63 et la Figure 64, il semblerait qu'une altération ait préexisté à la mise en place des pierres de Richemont, comme le suggère la photographie de 1947 montrant les dégâts causés par une fuite d'eau dans cette zone du Portail Royal (Figure 60). Cette pierre aujourd'hui altérée est la seule de cette zone à n'avoir pas été remplacée, et ce sans raison apparente.

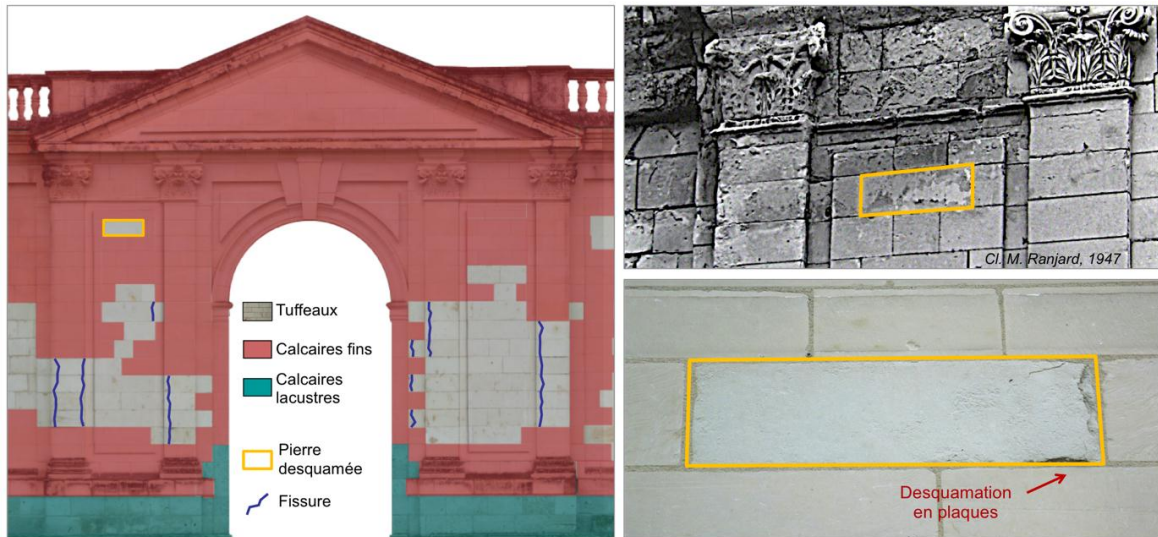


FIGURE 66 : ILLUSTRATION DES FISSURES ET D'UN DEPART DE DESQUAMATION EN PLAQUES SUR LE PORTAIL ROYAL

2.4.4.2. PERCEMENTS DE BAIES

Si bien des exemples mettent en évidence le développement de plaques proches de pierres remplacées en pierre de Richemont, d'autres cas ont été observés, n'impliquant pas de pierre de Richemont. Sur la tour du Chaudron par exemple, les desquamations en plaques sont nombreuses et étendues, et localisées près de reliefs. La zone de desquamation la plus importante se situe sur la travée n°9, autour de la baie inférieure n°11 (Figure 67). Une photo de cette zone prise en 1998 a été comparée avec l'état actuel, et l'on remarque que l'altération s'est légèrement étendue, mais en proportion, beaucoup moins que l'altération présentée Figure 65. Cette donnée, ajoutée à celle de la Figure 63, permet encore d'évoquer le fait que le détachement de la plaque n'évolue pas de manière linéaire. En revanche, aucune détection de plaque n'ayant été faite en 1998 ou en 2003, il n'est pas possible de savoir si la fissure a, elle, une évolution constante.

L'altération de la Figure 67 se situe autour d'une baie qui a été percée plusieurs siècles après la construction du château, en 1864. Seuls les trois claveaux du linteau et l'appui de la fenêtre (visible sur l'image) ont été ajoutés, en tuffeau. Les pierres des jambages ont simplement été retaillées. Une photographie de 1975, de très mauvaise qualité, permet de

distinguer cette zone à droite de la baie où l'altération avait déjà débuté à cette date, cent dix ans après le percement de la baie¹¹⁸.



FIGURE 67 : DESQUAMATION EN PLAQUES SUR LA TOUR DU CHAUDRON

Deux solutions de datation de cette altération sont possibles :

- Il n'existait aucune fissure ni aucune altération visible avant 1864, et c'est après le percement de la fenêtre et la pose de l'appui de fenêtre que la fissure s'est créée jusqu'au détachement de la plaque. Le percement, entraînant une perturbation du champ de contrainte et modifiant la descente de charge, est donc l'élément déclencheur : *les fissures et la desquamation ont moins de cent dix ans*, car si une altération était présente au XIX^e siècle, les pierres auraient été changées. De plus, l'appui de la fenêtre, à l'état neuf en 1864, est lui aussi desquamé.

¹¹⁸ Archives Départementales du Loiret (45), Fonds contemporain, documents DRAC 1339 W 564

- Il existait déjà une fragilisation du matériau avant 1864, avec peut-être la présence de fissures sous-jacentes dont la présence n'était pas détectable en surface, et la desquamation s'est produite après le percement de la fenêtre. Le percement est donc un élément aggravant, *la fissure a débuté il y a plus de cent cinquante ans, et la desquamation il y a moins de cent dix ans*, car le fait que les pierres n'aient pas été changées ne signifie pas que l'altération n'existait pas ou n'avait pas déjà été initiée.

Une photo de cette zone prise en 1998 a été comparée à l'état actuel, et l'on remarque que l'altération s'est légèrement étendue (Figure 67). La présence d'éléments en relief et de la fenêtre engendre des artefacts qui empêchent une bonne lisibilité des images obtenues en caméra thermique. En revanche, le diagnostic sonore réalisé et représenté sur la photographie permet de réaliser l'étendue de la fissure sous-jacente et les perspectives d'agrandissement possibles de la zone desquamée.

D'autres baies ont été percées postérieurement à la construction de la tour : la n°2 et la n°13, peu avant 1864. Les parements autour de la baie n°13 ont été nettoyés et pour certains remplacés dans les années 1970, et ceux tout autour de la baie n°2 ont été remplacés en 1994 (Figure 62). Il n'existe pas de photographies datant d'avant ces restaurations, mais on peut penser que les pierres autour de ces baies étaient également altérées et que la baie n°2 étant visible par le public, cette restauration a été privilégiée par rapport à la baie n°11, laissée en l'état. Ces percements, même s'ils n'ont entraîné que peu d'emploi de nouvelles pierres, ont sans doute fragilisé les parements, et l'insertion de linteaux, croisées en pierres et appuis de fenêtre, a probablement modifié l'orientation des descentes de charge.

Notons tout de même que d'autres percements de baies ont eu lieu sur les parties étudiées dans cette thèse. La moitié des fenêtres de l'aile Sud a été percée sous Louis XIV au XVII^e siècle, ce qui n'a pas pour autant entraîné de fragilisation de la pierre. On n'observe pas de desquamations ou de fissures aux abords de ces fenêtres, et les pierres des jambages n'ont pas été remplacées non plus. Il se peut qu'un soin plus important ait été apporté au percement de ces fenêtres au XVII^e siècle, par rapport aux fenêtres de la tour du Chaudron datant du XIX^e siècle. Il se peut aussi que l'épaisseur des murs de l'aile Sud étant constant d'un bout à l'autre de la façade, le percement ait eu moins d'impact sur le champ de contraintes appliqué aux pierres, alors que sur la tour du Chaudron, circulaire, l'épaisseur du mur est différente d'un jambage à l'autre d'une même baie.

De plus, il est possible que l'élément perturbateur ne soit pas le percement en lui-même entraînant la retaille et la mise à nu de parements, ni l'insertion de nouvelles pierres, mais tout simplement la mise en place d'un mortier non adapté mécaniquement. Dans le cas des desquamations qui se développent aux abords des parements remplacés en pierre de Richemont, il n'est pas exclu que ce soit aussi le mortier qui joue un rôle perturbateur.

En conclusion, il semblerait que dans de nombreux cas, la desquamation en plaques se développe à proximité d'une perturbation du parement, par la modification du champ de contrainte lors du percement de baies, ou lors de l'insertion de nouveaux matériaux, pierres ou mortiers. Cependant, les tuffeaux contigus à des restaurations d'une même date ne sont pas tous desquamés et ne présentent pas tous de fissures détectées sous la surface. De même, des desquamations en plaques peuvent être observées au niveau de zones *a priori* non « perturbées » par des remplacements de pierres ou des percements, mais simplement à proximité de reliefs. Il est donc possible que d'autres facteurs interviennent dans le déclenchement et dans le développement de cette altération. Les observations ne permettent pas d'en dire davantage à ce sujet, et des caractérisations physico-chimiques seront nécessaires pour approfondir le diagnostic.

3. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre ainsi que du précédent, était d'identifier pour chaque type d'altération, ses caractéristiques générales, la relation avec l'orientation des pierres concernées, et leur environnement, leur nature, et leur date de pose, afin d'évaluer le temps mis pour l'apparition et le développement de cette dégradation.

Les cartographies réalisées ont permis de localiser les altérations présentes sur les façades étudiées, et de corréler ces informations avec d'autres éléments comme les conditions environnementales. En fonction de la typologie des altérations observées et de leur localisation sur les façades, il a été possible de tenter d'identifier les facteurs environnementaux statistiquement associés à ces altérations. Ces facteurs sont divers, et peuvent être climatiques, anthropiques et/ou être liés à la nature de la pierre et sa position dans l'ouvrage. L'utilisation des données textuelles et iconographiques provenant des recherches historiques ont complété cette analyse en y apportant une notion temporelle : ces textes et images ont permis d'évaluer le temps de développement d'une altération sur une pierre neuve, et d'affirmer l'existence d'une altération à une époque donnée, et dans le cas contraire, d'en estimer son apparition.

Le Tableau 5 récapitule les différentes altérations relevées et cartographiées, et l'influence de l'orientation et de l'environnement sur leur développement. Les principales hypothèses envisagées pour expliquer l'origine de la dégradation sont également indiquées, ainsi qu'une appréciation du potentiel d'endommagement associé à chaque altération. Ce potentiel d'endommagement est une estimation empirique, mais elle pourrait être quantifiée (Fitzner *et al.*, 2002). Notons que l'importance que l'on accorde aux différentes altérations recensées diffère selon les époques. Par exemple, les colonisations biologiques ne sont pas décrites comme une réelle altération aux XVI^e et XVII^e siècle, ou du moins, elles ne font pas partie des remarques alarmantes sur l'état du château. De plus, la surface occupée par une altération n'est pas fonction du niveau d'endommagement : les lichens sont très étendus et envahissants au niveau des parements à l'inverse des desquamations, représentant un faible pourcentage de la surface des façades étudiées, mais irréversibles et très dommageables.

Altération	Cassures	Mousses et Lichens	Desquamations en feuillets	Desquamations en plaques
Localisation	Reliefs	Partie supérieure des reliefs Et parements droits	Partie inférieure des reliefs arrondis	Parties hautes et basses , proches de reliefs
Exposition/orientation	Aucune influence	À l'abri de la lumière directe et du vent	À l'abri du ruissellement et du vent	Zones exposées au ruissellement et au vent
Facteurs exogènes envisagés	Action anthropique, mécanique ...	Forte humidité, ombre	Forte humidité et séchage lent	Apport d'humidité et séchage rapide
Pierres concernées	Tuffeau	Tuffeau Calcaire fin Calcaire lacustre	Tuffeau Calcaire fin	Tuffeau

TABLEAU 5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES FACTEURS D'ALTERATION IDENTIFIES

La confrontation des données historiques (textuelles et iconographiques) et des relevés de l'état présent d'altération a permis d'estimer l'ordre de grandeur du temps mis par une altération pour croître jusqu'à devenir visuellement observable, à partir du moment où la pierre est posée et que les conditions nécessaires à son développement sont réunies (Figure 68).

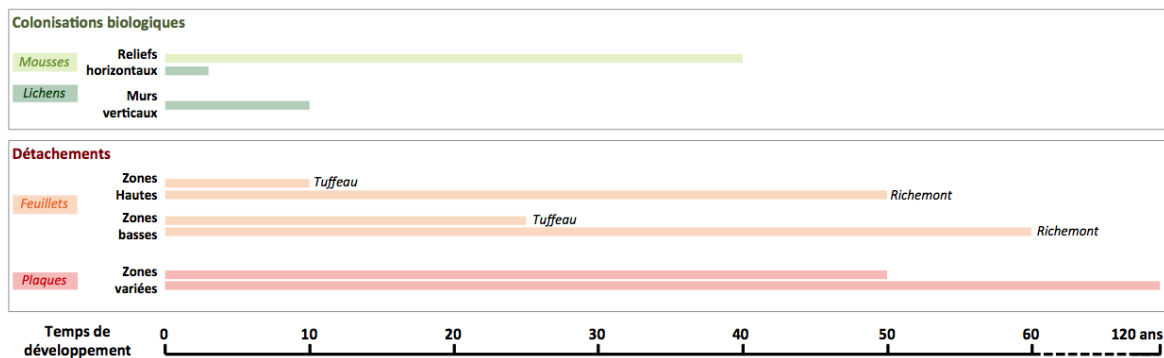


FIGURE 68 : ESTIMATION DU TEMPS DE DEVELOPPEMENT DE CHACUNE DES ALTERATIONS RECENSEES

Les altérations englobées sous le terme de « pertes de matières » par l'ICOMOS, sont principalement des cassures. Ce sont des altérations ponctuelles et non systématiques, indépendantes de la date de pose de la pierre, et dont l'apparition est imprévisible. Les facteurs à l'origine de cette altération ont très peu été cernés par l'analyse environnementale et historique. Ces cassures peuvent affecter les reliefs dès le début de la pose de la pierre, comme n'intervenir que des siècles plus tard. Ce type d'altération a donc toujours existé, depuis les débuts de la construction, jusqu'à aujourd'hui, les causes principales étant bien souvent d'origine anthropique. Leur analyse présente donc peu d'intérêt du point de vue de la localisation spatiale et de l'évolution temporelle.

L'étude a montré que les altérations biologiques peuvent concerner tous types de pierres. Ces altérations sont superficielles, ne sont pas reliées aux caractéristiques physico-chimiques des pierres, et peuvent affecter des tuffeaux très tendres comme des calcaires lacustres très durs. Ces altérations ont toujours existé depuis la construction du château, et leur temps de développement est rapide. À partir du moment où une pierre neuve est posée, ou une pierre ancienne nettoyée, le temps de développement des colonisations biologiques est variable selon le type d'altération et la localisation. Sur les reliefs horizontaux, les mousses peuvent mettre plus de quarante ans à s'installer, alors qu'il faut moins de cinq ans aux lichens pour se développer. Ce temps de développement des lichens est en revanche plus long pour les parements verticaux.

Enfin, parmi tous les types d'altérations observées sur le Château de Chambord, les détachements par desquamation sont les dégradations les plus alarmantes car les plus dommageables. Elles ont aussi les processus d'altération les plus longs, dont la durée dépend de la position dans l'architecture et du substrat sur lequel elle se développe. Elles sont les plus pertinentes à étudier car à la fois les plus complexes, les moins réversibles, et les plus utiles à comprendre pour le gestionnaire d'ouvrage.

Les desquamations en feuillets affectent la superficie de la pierre de manière irréversible. La dégradation est très dommageable, mais peu étendue, et souvent localisée dans des zones abritées, donc peu visibles. Une zone abritée de l'action directe des pluies mais néanmoins humide, et une zone située sous le vent, garantissant un séchage lent, sont des conditions qui semblent permettre le développement de cette forme de desquamation, bien qu'il soit connu que d'autres facteurs d'origine physico-chimique puissent également entrer en compte. Les feuillets peuvent apparaître moins de soixante ans après la pose de la pierre si ces conditions sont réunies. Le temps de développement semble deux fois plus long pour la pierre de Richemont que pour le tuffeau. Les premières altérations en feuillets recensées sont celles des pierres déposées dans le musée lapidaire du château autour de 1890. Il reste cependant possible que cette altération soit apparue plus tôt dans le temps, mais il n'en existe aucune preuve textuelle ou iconographique.

Les desquamations en plaques, à l'inverse de celles en feuillets, se développent sur les parties exposées des parements, et peuvent provoquer des problèmes de sécurité, en plus d'un effet inesthétique, une fois la plaque tombée. Ce type de dégradation est difficilement

corrélable à l'orientation ou à la position de la pierre sur le bâtiment. Un relief ou un élément perturbateur postérieur à la pose de la pierre sont parfois observables à proximité de cette altération. Ils sont peut-être responsables de l'initiation de l'altération, par génération d'une fissure sous la surface, ou bien de l'aggravation d'une fissure préexistante et du détachement de la plaque. Cet élément perturbateur semble souvent être la conséquence d'une restauration avec remplacement de pierres et de mortiers de rejointoiement. Dans le cas de remplacements en pierre de Richemont, les desquamations en plaques observées sur les tuffeaux aux alentours se développent en moins de cinquante ans. D'autres cas sont observés, dont les restaurations datent du milieu du XIX^e siècle et où l'altération en plaques est apparue moins de cent dix ans après. Cette plage chronologique est large, et pourrait peut-être être considérablement réduite, mais il n'y a pas toujours suffisamment de sources iconographiques complètes et détaillées pour pouvoir obtenir des fourchettes chronologiques plus fines. De nombreux doutes persistent encore, et ces hypothèses doivent être considérées avec prudence.

L'apparition des phénomènes de desquamations sur le château de Chambord pourrait être un phénomène récent, à l'échelle du siècle. Les hypothèses formulées ne pourront être valides que lorsqu'elles auront été appuyées par des analyses physico-chimiques des différents faciès d'altération. Il sera donc nécessaire d'effectuer des prélèvements sur des zones représentatives de ces altérations afin de caractériser précisément leur morphologie et leur composition.

CHAPITRE 5

DIAGNOSTIC DES DESQUAMATIONS EN PLAQUES ET EN FEUILLETS

Dans ce chapitre, l'accent est porté sur la caractérisation et la compréhension des mécanismes à l'origine des altérations les plus dommageables observées sur le château de Chambord : les desquamations en plaques et en feuillets. Ces altérations sont étudiées en lien avec les données de la littérature, et systématiquement replacées dans le contexte environnemental et historique propre au château. L'état de l'art concernant les différents mécanismes et/ou interprétations avancés dans la littérature pour expliquer ces altérations est présenté et discuté. Des échantillons représentatifs des différents stades de développement des altérations ont été prélevés par carottage au château de Chambord. Une caractérisation physico-chimique et texturale de ces échantillons a été réalisée grâce aux techniques d'analyse complémentaires : diffraction des rayons X, chromatographie ionique et microscopie électronique à balayage associée à la microanalyse. Une « cartographie » interne de la pierre selon la profondeur a été tracée dans l'objectif de montrer l'évolution de la composition minéralogique et chimique et de la microtexture consécutive au processus d'altération.

La suite du chapitre est consacrée au gypse, le minéral exogène identifié dans les desquamations en plaques et en feuillets. Ainsi, toutes les sources du gypse, naturelles et anthropiques, la pollution atmosphérique ancienne et actuelle, sont examinées et discutées. Enfin, une comparaison entre la caractérisation des desquamations en plaques et en feuillets, et des conditions environnementales associées à leur développement à Chambord a permis de mettre en évidence certains facteurs communs et d'autres discriminants. Ces éléments supplémentaires permettent de critiquer les différents mécanismes d'altération envisagés, et notamment d'argumenter sur le rôle du gypse.

1. LE PHÉNOMÈNE DE DESQUAMATION EN PLAQUES – ÉTAT DE L'ART

Les auteurs s'accordent souvent pour dire que de nombreuses dégradations de parements en tuffeaux sont dues à un mauvais entretien des bâtiments, ou bien à une utilisation inadaptée des pierres en fonction de leur emplacement, de nombreux dégâts étant causés par des vices de construction (Jeannette *et al.*, 1985 ; Pochon, 1968). J.-P. Cautru (1976) définit même l'altération du tuffeau comme un « révélateur de la faute ancienne ».

L'eau est décrite comme le principal vecteur d'altération, que ce soit parce qu'elle entraîne des modifications de la composition de la pierre par dissolution de ses constituants, qu'elle contribue aux variations dimensionnelles du matériau, ou qu'elle véhicule des sels polluants. Conjointement, la porosité du tuffeau et ses constituants sont également mis en cause, et la probable contribution de divers facteurs rend difficile la formulation d'hypothèses et la description des mécanismes de formation de la desquamation en plaques.

Les différentes hypothèses décrites dans la littérature et diversement acceptées par la communauté scientifique seront présentées ici, tout en évaluant leur crédibilité vis à vis du matériau considéré : le tuffeau.

1.1. LE TUFFEAU ET SES PROPRIÉTÉS

Les pierres analysées dans cette première étude de caractérisation sont uniquement des tuffeaux. Le tuffeau est une pierre calcaire sédimentaire blanchâtre à grains fins et très poreuse, dont la formation géologique s'étend sur tout le Val de Loire (Rautureau, 2001 ; Dessandier, 1995). On peut parler de la famille des tuffeaux car les caractéristiques physiques et physico-chimiques du tuffeau, comme la porosité, les propriétés mécaniques et les proportions de ses minéraux constitutifs sont variables d'une carrière à l'autre, et d'un banc à l'autre pour une même carrière. Les caractéristiques du tuffeau n'ont pas été de nouveau analysées dans cette étude, car elles sont bien connues et décrites dans la littérature (Van, 2008 ; Beck, 2006 ; Rautureau, 2001 ; Brunet-Imbault, 1999 ; Chéné, 1999 ; Dessandier, 1995 ; Martinet et Macaire, 1991 ; Rigo, 1990 ; Clément *et al.*, 1990 ; Blanc et Jaton, 1970).

Les tuffeaux sont constitués de différents minéraux visibles sur la Figure 69 qui représente une section polie observée au microscope électronique à balayage. Des minéraux argileux sont présents, comme la *glauconite*, l'*illite*, et la *smectite*, ainsi que des micas (*muscovite* et *biotite*). De la silice (SiO_2) est également présente sous deux formes : le *quartz*, minéral parfaitement cristallisé, et l'*opale cristobalite-tridymite (CT)*, silice hydratée amorphe, sous forme de sphérules très régulières d'environ 10 μm de diamètre. Différents carbonates de calcium peuvent être observés comme la *micrite* formée de cristaux de calcite très fins et la *sparite*, composée de cristaux de calcite plus grossiers, de texture saccharoïde. Enfin, répartis de manière hétérogène et en faibles quantités, on observe des amas de silice irréguliers qui pourraient être des débris d'organismes silicifiés, du *rutile*, qui est un minéral composé de dioxyde de titane, ou de la *pyrite*, un sulfure de fer.

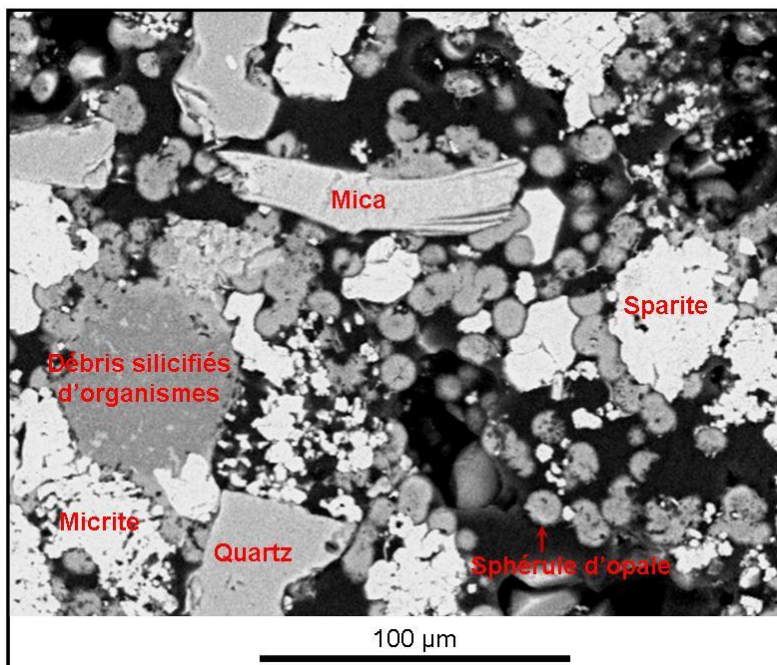


FIGURE 69 : IMAGE D'UNE SECTION POLIE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE, EN MODE ELECTRONS RETRODIFFUSES, AVEC IDENTIFICATION DES MINERAUX CONSTITUTIFS A PARTIR D'ANALYSES ELEMENTAIRES MEB-EDX (X 500)

Le Tableau 6 présente les proportions moyennes des principaux minéraux du tuffeau, ainsi que ses principales caractéristiques mécaniques et texturales : une résistance en compression faible et une porosité très élevée. L'ensemble des propriétés du tuffeau en fait une pierre tendre et sensible aux variations environnementales.

Composition minéralogique	Calcite $\approx 50\%$ Sphérules d'opale CT $\approx 30\%$ Quartz $\approx 10\%$ Minéraux argileux $\approx 10\%$
Résistance en compression	5 MPa (saturé) 10 MPa (sec) Anisotropie = 20%
Masse volumique apparente	1,3 g/cm ³
Masse volumique du solide	2,5 g/cm ³
Porosité	40-45%
Diamètre seuil d'accès aux pores	5 μm
Perméabilité	10^{-13} m^2

TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES MOYENNES DU TUFFEAU (BECK, 2006 ; DESSANDIER, 1995)

1.2. HYPOTHESES DE PROPOSITIONS DE MECANISMES DE FORMATION DE LA DESQUAMATION EN PLAQUES

1.2.1. LA DISSOLUTION DES MINÉRAUX ET LES MODIFICATIONS TEXTURALES

Une des hypothèses formulées met en jeu des phénomènes de vieillissement de la pierre en contact avec l'eau. Il est possible, comme le montre la Figure 70 d'après le mécanisme proposé par Brunet-Imbault (Rautureau, 2001 ; Brunet-Imbault, 1999), qu'au cours du temps, la circulation des fluides dans la pierre conduise à la dissolution de la calcite et à sa migration vers la surface où a lieu l'évaporation, ainsi que d'autres particules en suspension dans la solution (argiles, oxydes de fer, autres sels...). La calcite recristalliserait alors dans les premiers centimètres de la pierre, et boucherait ainsi progressivement la porosité (A et B). Les premiers centimètres de la pierre (1,5 à 3 cm en moyenne) présenteraient une porosité inférieure au reste de la pierre, limitant fortement l'évacuation des fluides. Ces fluides, pouvant provenir des remontées capillaires, circuleraient donc parallèlement à la surface, entraînant avec le temps une dissolution locale des constituants de la pierre à cet endroit, fragilisant ainsi la pierre et favorisant la formation d'une zone de fissuration parallèle à la surface (C). L'étape finale serait ensuite le détachement de la plaque (D). Principalement applicable aux desquamations observées en milieu urbain, cette hypothèse a été formulée concernant les desquamations en plaques prélevées sur la cathédrale Saint-Gatien de Tours, auxquelles sont également associées des croûtes noires en surface, dues à la pollution (Humbert, 1999). Des vieillissements artificiels ont également été réalisés sur des tuffeaux utilisant une succession de cycles d'imbibition/séchage avec de l'eau pure. Il semblerait que la porosité en surface est

obstruée progressivement par l'accumulation de la calcite solubilisée plus en profondeur et remobilisée jusqu'à la surface (Beck, 2006 ; Verges-Belmin *et al.*, 2001 ; Chéné, 1999). Cependant, la formation d'une plaque n'a pas pu être reproduite suite à ce processus.

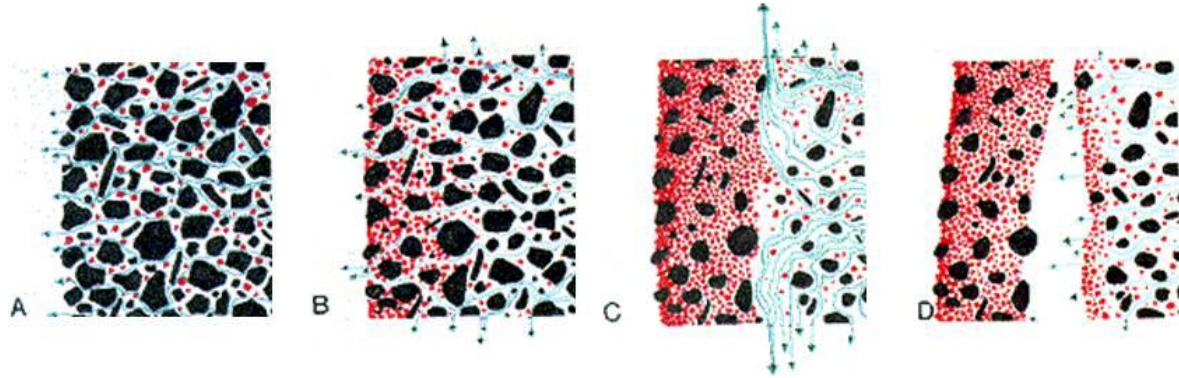


FIGURE 70 : PROPOSITION DE SEQUENCE DE DEVELOPPEMENT, CHRONOLOGIQUE ET SPATIALE, D'UNE ALVEOLATION EN PLAQUES (D'APRES BRUNET-IMBAULT, 1999 ET RAUTUREAU, 2001)

1.2.2. LES DILATATIONS THERMO-HYDRIQUES ET LE RÔLE DES MINÉRAUX ARGILEUX

La succession de cycles d'imbibition/séchage entraînant des variations de dilatations hydriques pourrait conduire à la formation d'une desquamation en plaques. L'épaisseur de la plaque, moins de 3 cm, correspondrait à la zone imbibée lors d'une forte pluie. En effet, des cycles de dilatations différentielles se produiraient entre la zone imbibée par les pluies, et pouvant donc être soumise à des gonflements, et le cœur de la pierre, non imbibé par l'eau et donc non soumis à des dilatations hydriques. Avec la fatigue progressive du matériau soumis à ces successions de cycles de dilatations différentielles et aux charges des parements, la pierre finirait par se fissurer selon un plan parallèle à la surface exposée aux pluies battantes, au niveau de l'interface entre les zones imbibée et non-imbibée, et donc à la profondeur limite atteinte par les eaux de pluie (Benavente *et al.*, 2008 ; Sebastian *et al.*, 2008). Une fois la fissure suffisamment importante, la plaque se détacherait de la paroi. Même si ce phénomène est principalement étudié actuellement au sujet des grès présentant une importante fraction argileuse (Colas *et al.*, 2011), il a également été évoqué au sujet des tuffeaux. En effet, les tuffeaux possèdent une teneur importante en minéraux argileux (muscovite, glauconite, smectite, et illite, autour de 10 %) dont certains minéraux présentent un caractère gonflant (principalement la smectite) et accentueraient ces phénomènes hydriques naturels de dilatation des pierres soumises à une imbibition lors d'un épisode de pluie (Berthonneau *et al.*, 2012 ; Bigas et Martinet, 2009 ; Jeannette, 1992). Ces valeurs de dilatation hydrique du tuffeau

sont autour de 0,7 à 0,8 mm.m⁻¹ (Vergès-Belmin, 2001). Selon Lazzarini et Tabasso (1989), pour ces matériaux contenant des minéraux argileux et présentant des desquamations en plaques, l'influence d'autres facteurs serait négligeable face aux importantes variations dilatométriques dues aux modifications thermo-hydriques. Selon Mertz (2012), les dilatations thermo-hydriques sur des tuffeaux en voie de desquamation montrent un comportement non linéaire traduisant un effet de fatigue, lié à l'emmagasinement des contraintes résiduelles, au-delà duquel l'altération peut pleinement s'exprimer.

Des tuffeaux desquamés ont été caractérisés, provenant de l'église Saint-Gilles d'Argenton-les-Vallées dans le département des Deux-Sèvres (Bromblet, 1992), et ceux du portail de la chapelle Notre-Dame de Montplacé à Jarzé dans le département du Maine-et-Loire (Bromblet, 1994). L'altération par desquamation a été attribuée aux propriétés gonflantes des minéraux argileux, en particulier la smectite (Clément *et al.*, 1990). Il n'est pas établi que tous les phyllosilicates présents dans le tuffeau puissent être à l'origine de gonflements pathogènes. En revanche, il est possible que lors du séchage, le gonflement de la zone imbibée puisse générer à l'interface avec la zone sèche une traction supérieure à la résistance en traction de la pierre (Berthonneau *et al.*, 2012). Les cycles de gonflement mais aussi de retrait au cours de l'imbibition et du séchage des premiers centimètres de la pierre, conduiraient donc à la fatigue puis à la rupture de la pierre. Dans le deuxième cas d'étude cité, à Jarzé, du gypse localisé au niveau de la fissure a également été détecté, et sa possible relation avec le processus de desquamation a été évoquée.

1.2.3. LE CAS DU GEL

Le gel comme facteur responsable de la fissuration de la pierre a également parfois été proposé, et son rôle serait directement relié à la porosité de la pierre, mais aussi à son état de saturation en eau. Lorsque l'eau gèle, l'expansion volumique est de 9 %, mais n'est pas systématiquement à l'origine de son éclatement (Letavernier, 1984), à moins que la résistance mécanique de la pierre et sa cohésion ne soient inférieures à la pression générée par les cristaux de glace (Bigas et Martinet, 2009). Les éclatements de la roche sont souvent la conséquence de la pression hydrostatique de l'eau liquide sur les parois des pores, lorsque le front de gel progresse de la surface vers le cœur (Thomachot, 2002).

La porosité du tuffeau étant très fine, il faut des températures nettement inférieures à zéro, sur des périodes longues, pour que l'eau comprise dans ces micro-pores gèle. De plus, la

saturation du réseau poreux du tuffeau lors d'un épisode de pluie et d'une imbibition capillaire n'est généralement pas suffisante (de l'ordre de 80 % - Beck, 2006) pour que l'expansion de la glace ait des conséquences dommageables. Il faudrait pour cela une succession importante de cycles de gel/dégel que les températures mesurées dans la région de Chambord ne permettent pas (Jeannette, 1992 ; Clément *et al.*, 1990 ; Letavernier, 1984).

De plus, les fracturations dues au gel se développent plus souvent dans le cas de pose de pierres en délit, pour des sculptures, par exemple, où la pierre est taillée et posée en laissant le litage parallèle au parement (Jeannette, 1992), alors qu'il devrait être horizontal. Sur le château de Chambord, et sur les tuffeaux en général, il ne semble pas que les pierres desquamées en plaques soient posées en délit.

Il n'est pas possible d'affirmer que le gel est directement responsable du phénomène de desquamation en plaques du tuffeau. En revanche, il pourrait être à l'origine d'une accentuation du développement de la fissure, ou bien de la chute accélérée d'une plaque (Bost, 2008).

1.2.4. PRÉSENCE DE MINÉRAUX EXOGÈNES

Jeannette (1992) semble distinguer la morphologie des plaques dont la formation est due à des dilatations hydriques ou à des éclatements dus au gel sur diverses pierres, de la morphologie des plaques observées généralement sur les tuffeaux, comme celles relevées sur le château de Chambord. Ces dernières semblent se développer sur des murs droits, et concerner parfois plusieurs pierres jointives sur un même parement (Figure 65). Elles se développent toutefois préférentiellement aux abords de joints de mortiers, ou de reliefs et de pierres d'angle (pilastres, encadrement de baies,...) sur une pierre présentant une plus grande surface exposée aux pluies, et également une plus grande surface soumise au séchage. L'imbibition et l'évaporation sont donc deux paramètres qui semblent déterminants dans le développement de cette altération. L'accent est même mis sur les jambages des baies, plus largement soumis aux ruissellements et aux pluies que les murs droits, et dont la position en angle favorise l'évaporation des solutions de la roche et la concentration de sels possiblement responsables de l'altération (Jeannette *et al.*, 1985). Cette disposition de l'altération aux abords des baies est semblable à ce que l'on peut observer sur les baies de la tour du Chaudron, décrites dans le chapitre précédent, dont les jambages sont très fissurés et en partie desquamés.

De nombreux auteurs relient le développement des desquamations en plaques à la présence de minéraux exogènes : des sels. Le gypse, sulfate de calcium dihydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, est souvent cité comme principal sel directement responsable de ces altérations (Dessandier, 1995 ; Hammecker, 1993 ; Jeannette *et al.*, 1985 ; Cautru, 1976).

Ces desquamations en plaques seraient dues à une accumulation de sels exogènes en profondeur de la pierre, véhiculés depuis la surface par les pluies battantes. Lors du séchage, la surface sèche avant le cœur de la pierre. Si la diffusion de la vapeur d'eau à travers la couche sèche en surface est supérieure à la vitesse de migration de la solution à travers le milieu poreux depuis la zone humide jusqu'à la zone sèche, alors le front d'eau liquide se situe sous la surface de la pierre. Dans ce cas, la cristallisation des sels aura lieu à l'intérieur de la pierre ce qui peut la fragiliser progressivement et la fissurer si la pression de cristallisation est supérieure à la résistance en traction de la pierre (Lazzarini et Tabasso, 1989 ; Dessandier, 1995).

Le profil d'une pierre ayant subi une desquamation en plaques est généralement composé de trois couches : un premier centimètre de pierre cohésive, une zone de fissuration importante enrichie en sels exogènes, et enfin une pierre de nouveau cohésive, sous la plaque, dont la concentration en sel diminue progressivement en fonction de la profondeur (Jeannette, 1992 ; Thomachot, 1998). La profondeur de cristallisation des sels dépend de la vitesse de séchage, mais également des propriétés de la pierre : sa porosité, sa perméabilité. C'est ce qui pourrait expliquer l'épaisseur variable des plaques, un centimètre en moyenne, mais parfois jusqu'à trois centimètres.

Le sel n'est pas seul responsable de la formation de la plaque. En effet, l'enrichissement en sels de la pierre modifie ses propriétés physico-chimiques et sa réponse aux sollicitations extérieures. Les variations dilatométriques et la circulation des fluides peuvent ainsi être modifiées et engendrer le détachement de la plaque. Les phénomènes décrits dans le paragraphe 1.2.2 de ce chapitre peuvent alors avoir une influence conjointe à la présence de sels (Jeannette *et al.*, 1985).

En effet, la relation directe entre la cristallisation du gypse et la formation de la fissure n'a jamais été démontrée, et il est possible que cette fissure soit la conséquence d'un autre phénomène et que le gypse se soit accumulé à cet endroit a posteriori (Furlan et Girardet, 1983 ; Félix, 1985). Des études évoquent le fait que les effets cumulés de la cristallisation de sels dans le milieu poreux et la présence de minéraux argileux seraient à l'origine de la

formation de fissures dans le matériau au cours de cycles d'imbibition/séchage. En effet, les plus petits pores de ces pierres sont dus aux minéraux argileux et c'est dans ces espaces que les sels qui cristallisent provoquent le plus de dégâts. La présence de minéraux argileux ne serait pas une condition nécessaire à l'éclatement de la pierre sous la pression de cristallisation des sels, mais un facteur aggravant (McGreevy et Smith, 1984). D'autres études évoquent les modifications physico-chimiques et les transformations subies par des minéraux argileux en présence de sulfates, entraînant de possibles modifications de la composition de la pierre (Soukupová *et al.* 2002).

Des analyses ont été faites sur des tuffeaux desquamés prélevés en zone rurale sur des bâtiments d'habitation ou des monuments classés, révélant une présence de gypse au niveau du réseau de fissures des plaques prélevées (Cautru, 1976). Des tuffeaux de provenances diverses utilisés en contexte urbain ont également été prélevés dans des villes du val de Loire, puis analysés, révélant la présence systématique de gypse à la base de la plaque (Mertz et Verzier, sans date). Dans l'étude de cas faite sur l'abbaye de Fontevraud, les mêmes constatations sont faites (Jeannette *et al.*, 1985). Il s'agit de desquamations en plaques observées sur des tuffeaux posés au XIX^e siècle. Cet exemple permet de prouver que si les conditions nécessaires au développement d'une plaque sont réunies, cette altération peut se développer rapidement, en moins d'un siècle.

Si, sur le château de Chambord, seuls les tuffeaux sont concernés par la desquamation en plaques, sur d'autres édifices elle peut toucher des pierres de natures diverses. Des calcaires variés employés à Notre-Dame-la-Grande de Poitiers (Hammecker, 1993), des soubassements en granite à Nantes, des molasses du Dauphiné (Jeannette, 1992) ou encore des grès molassiques de la région de Lausanne, sont également sujets à ces desquamations avec des concentrations significatives en sels mesurées à l'emplacement de la fissure (Félix, 1985). De même, deux pierres de natures différentes, mises en œuvre dans un même édifice et soumises aux mêmes conditions environnementales, peuvent ne pas s'altérer de la même manière, les unes pouvant favoriser la formation d'une plaque, les autres, celle de feuillet. C'est donc que les caractéristiques de la pierre elle-même interviennent dans ce phénomène de desquamation, et en particulier la morphologie du réseau poreux (Vergès-Belmin, 1992 ; Hammecker, 1987).

2. CARACTERISATION DES DESQUAMATIONS EN PLAQUES

Une zone d'altération mise en évidence dans le chapitre précédent (Figure 67), a été sélectionnée pour faire l'objet d'une caractérisation plus fine de son état d'altération par le biais de prélèvements analysés ensuite en laboratoire. Cette zone est considérée comme représentative des desquamations en plaques observées sur les façades étudiées. Des prélèvements complémentaires ont ensuite été effectués dans d'autres zones du château afin de vérifier la cette représentativité.

Les prélèvements ont été réalisés sous forme massive (fragments détachés ou carottages) et complétés ensuite par des prélèvements uniquement sous forme de poudre, quelques milligrammes grattés en surface de la pierre, au niveau de zones saines ou de zones altérées. Une fois les analyses physico-chimiques et texturales réalisées, les résultats obtenus seront comparés aux études de cas déjà réalisées par le passé, sur d'autres sites dont les pierres des parements en tuffeau présentaient des desquamations en plaques (Rigo, 1990 ; Jeannette *et al.*, 1985 ; Cautru, 1976 ; Pochon, 1968).

2.1. CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

2.1.1. CHOIX DE LA ZONE

C'est sur la tour du Chaudron que les altérations les plus dommageables et les plus étendues ont été relevées. La zone sélectionnée pour effectuer les prélèvements se situe sur la travée n°9, autour de la baie inférieure n°11, qui présente un état d'altération assez avancé (Figure 71).

L'étude historique a permis de dater pierre à pierre les façades, et donc de s'assurer que les prélèvements effectués dans cette zone altérée ont bien lieu sur des pierres d'origine en tuffeau datant du XVI^e siècle. Cette étude a également permis de mettre en évidence que cette altération a débuté tardivement par rapport à la date de pose des pierres au XVI^e siècle. En effet, la baie a été percée en 1864, soit bien après la construction de la tour. Le percement de la fenêtre du bas date de 1864 ; l'appui et les trois claveaux ont été posés au moment du percement, et les autres pierres ont été retaillées à partir des pierres d'origines laissées en place. La répartition de l'altération semble liée à la position de la fenêtre (voir chapitre 4).



FIGURE 71 : CARTOGRAPHIES DE PROVENANCE, DE DATATION, ET DE L'ÉTAT D'ALTÉRATION DES PIERRES DE LA TRAVEE N°9

2.1.2. ÉCHANTILLONNAGE

Les desquamations en plaques, malgré une fissuration de la pierre, ont pu être prélevées sous forme de carottes de 3 cm de diamètre. Trois pierres de taille sont concernées par les carottages, effectués à sec pour éviter tout risque de dissolution de sels (Figure 72) :

- l'une qui ne présente pas d'altération visible en surface (A)
- l'autre en cours de desquamation (B)
- une dernière entièrement desquamée (C)

L'objectif est de prélever des échantillons représentatifs des différents stades de développement de l'altération en plaques, depuis un matériau en apparence sain, sans fissure sous-jacente (A1, B1), jusqu'à une desquamation complète de la pierre dont la surface pulvérulente s'est réindurée par la formation d'une patine (C1), en passant par une pierre fissurée dont la plaque est en cours de formation, qu'elle soit tombée (B3) ou non (A2, B2). Les photographies prises en 1998 par C. Thomachot (Figure 67) permettent de constater que la pierre avait déjà largement commencé à se desquamer en 1998, mais la surface de la carotte B3 prélevée pour ce travail de thèse, n'était pas encore mise à nu en 1998, la desquamation n'étant pas aussi étendue.

La Figure 72 illustre la position de ces prélèvements, notamment en fonction du diagnostic sonore préalable permettant de localiser les fissures sous la surface de la pierre. La localisation de la fissure peut être utilisée comme traceur pour estimer une chronologie relative de l'évolution de la plaque. Avec les informations disponibles, il reste cependant impossible de préciser l'aspect temporel, seul l'enchaînement des différentes étapes dans le processus d'altération peut être apprécié, par l'établissement d'une chronologie relative des différents stades d'évolution de l'altération.

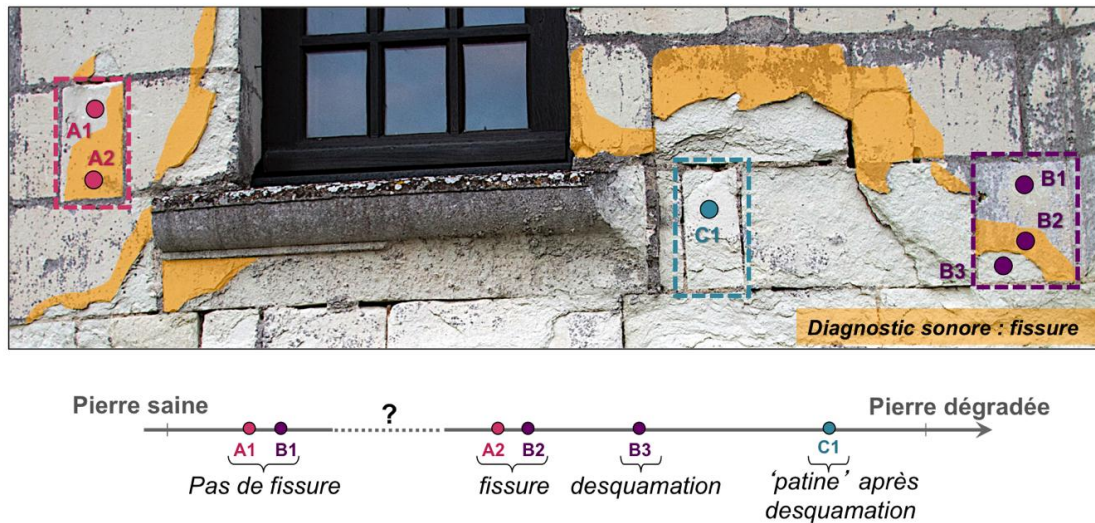


FIGURE 72 : LOCALISATION DES PRELEVEMENTS PAR CAROTTAGE ET REPRESENTATION DES DIFFERENTS STADES D'ALTERATION SUR UNE FRISE ARBITRAIRE DU TEMPS

La partie la plus altérée, à droite de la fenêtre, présente une desquamation en plaques sur plusieurs épaisseurs. Ce n'est pas uniquement une fissure, mais un réseau de fissures parallèles à la surface qui se développe. Les strates de ce réseau de fissures sont visibles sur la Figure 73, où l'on repère des fissures, et donc des décollements de plaques, situées à 9, 18 et 30 mm de profondeur par rapport à la surface originelle de la pierre. Celles-ci se retrouvent sur les carottes prélevées dans cette zone (Figure 74).

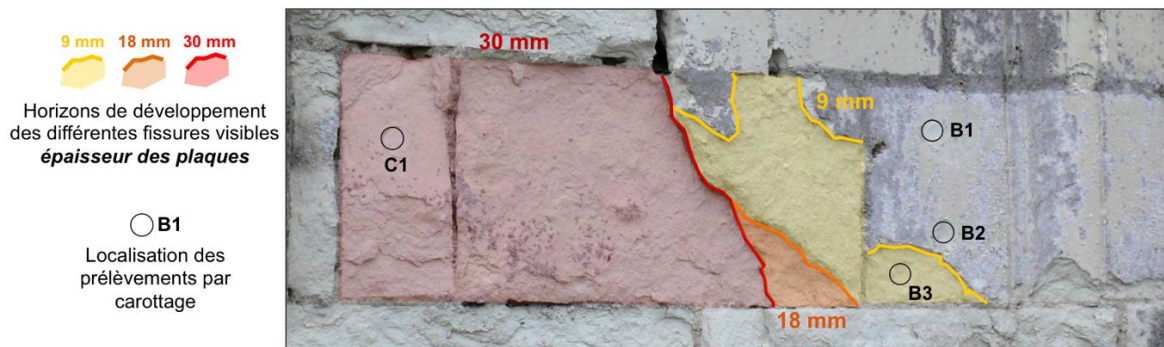


FIGURE 73 : RESEAU DE FISSURES DE LA ZONE DESQUAMEE, OBSERVABLE A DROITE DE LA FENETRE

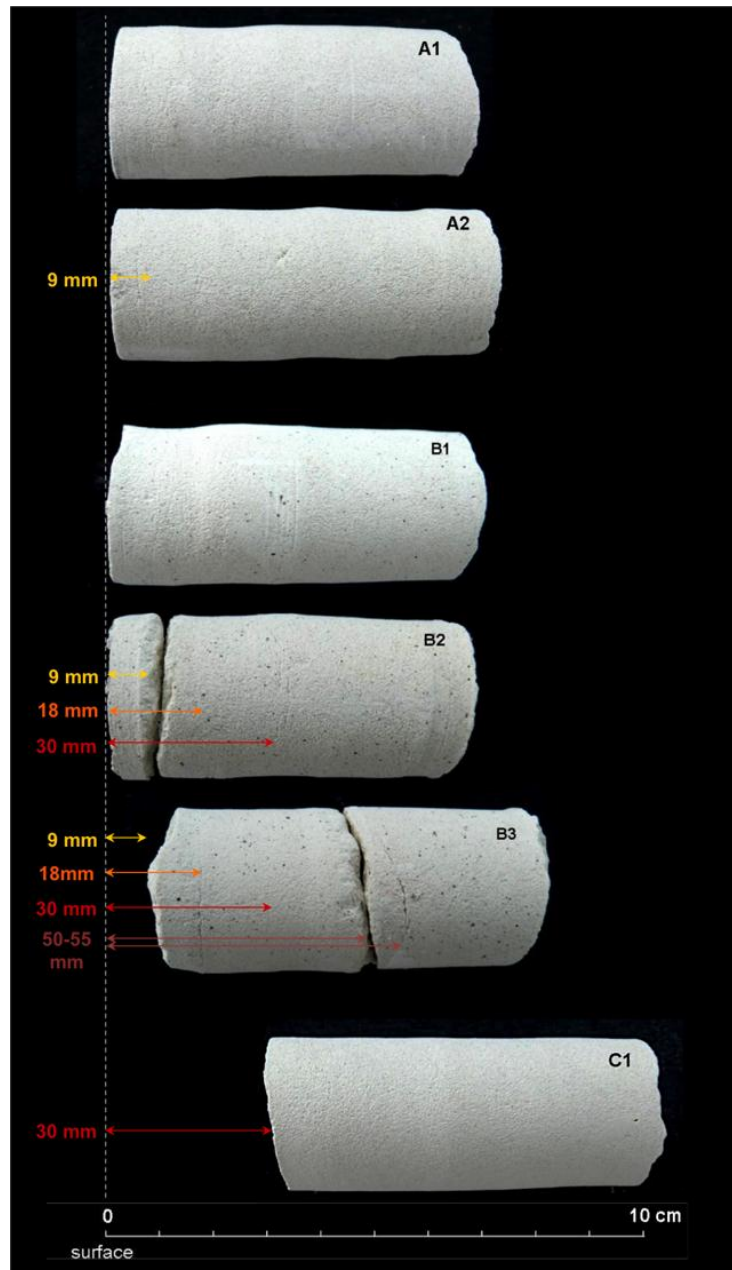


FIGURE 74 : PRELEVEMENTS PAR CARROTAGES DE DESQUAMATIONS EN PLAQUES AUTOUR DE LA FENETRE DE LA TRAVÉE N°9

La surface externe des carottes A1 et A2 se situe au même niveau que celle des carottes B1 et B2, c'est à dire au niveau de l'épiderme d'origine de la pierre. La première fissure à l'origine de la desquamation se situe à 9 mm de profondeur sous la surface. Une très légère fissure est visible sur l'échantillon A2, sans qu'il y ait encore de détachement de matière. En revanche, sur la carotte B2, la fissure est franche et la carotte en deux morceaux, et des fissures plus légères sont déjà détectées à 18 et 30 mm de profondeur. Sur la carotte B3, la pierre est déjà desquamée, et la surface extérieure de cette carotte, pulvérulente, correspond à la desquamation due à la fissure à 9 mm de profondeur. Les mêmes fissures que sur B2 sont

visibles, ainsi que deux plus importantes entre 50 et 55 mm. Enfin, la surface extérieure de l'échantillon C1 correspond à une succession de desquamation, dont la dernière est due à une fissure située à 30 mm sous la surface. À l'inverse de B3, l'échantillon C1 ne paraît pas fissuré davantage en profondeur.

À 1 cm de profondeur environ, il ne s'agit pas d'une fissure unique, mais d'un fin réseau de fissures parallèles les unes aux autres, l'une de ces fissures devenant ensuite plus large que les autres, entraînant le détachement de la plaque.

Les carottages effectués ont été soigneusement rebouchés à l'aide d'un mortier composé de poudre de tuffeau et d'un mélange de chaux aérienne/chaux hydraulique afin d'être le plus compatible possible avec la pierre. Les observations réalisées à la caméra thermique ont permis de vérifier après séchage du mortier, que celui-ci avait des propriétés thermiques semblables à celles de la pierre.

Même si le nombre de carottages a été limité au strict nécessaire, ces prélèvements n'en sont pas moins invasifs, et représentent sans conteste un élément perturbateur de cet ensemble de pierres. Le fait d'avoir prélevé à cet endroit aura peut-être un impact sur l'évolution de la desquamation en plaques, en l'accéléralant. Mais le prélèvement d'échantillons massifs est le seul moyen d'obtenir une caractérisation fine de la pierre selon sa profondeur.

2.2. ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE ET TEXTURALE

2.2.1. ANALYSE DES SURFACES DESQUAMÉES ET NON DESQUAMÉES

2.2.1.1. DIFFRACTION DE RAYONS X

Si l'on ne considère que les surfaces, les trois zones prélevées forment trois ensembles distincts :

- Les prélèvements A1, A2, B1 et B2 présentent une surface qui est celle d'origine, lorsque la pierre a été posée il y a près de 500 ans
- Sur la pierre C, la surface d'origine s'est desquamée à une date inconnue, plus ancienne que pour l'échantillon B3, mais il y a un peu moins de 110 ans. Cette surface a été pulvérulente, puis s'est progressivement réindurée par une nouvelle patine

- À la surface de l'échantillon B3, la pierre est pulvérulente et peu cohésive, car la plaque de pierre qui la recouvrait est tombée récemment, entre 1998 et 2009

Aucune colonisation biologique ne recouvre la pierre C pour le moment, alors que des lichens se sont développés à la surface des pierres A et B, les recouvrant partiellement. La nature des lichens n'a pas été caractérisée, en revanche, des composés liés à leur activité biologique ont été identifiés par la diffraction de rayons X (DRX). Il s'agit de minéraux exogènes à la pierre tels que des oxalates de calcium. La diffraction de rayons X sur massif réalisée sur l'extrême surface de la plaque a permis de localiser ces oxalates dans les premiers 200 μm par rapport à la surface. La présence d'oxalate de calcium est généralement rapprochée de l'existence de lichens endolithiques, dont la présence dans les premiers 200 μm des pierres étudiées est confirmée par l'observation au microscope optique d'un échantillon en coupe (Figure 75). Les lichens sont des organismes multicellulaires composés d'un champignon et de cyanobactéries. On ne sait pas exactement lequel de ces deux constituants est à l'origine de la production d'acide oxalique qui réagirait avec la calcite de la pierre (Brunet-Imbault, 1999). Ces oxalates de calcium sont généralement présents dans les 50 premiers microns de l'épiderme de la pierre. La couche d'oxalate ainsi formée, avec des pores plus fins, limiterait la pénétration d'eau liquide dans la pierre mais permettrait les phénomènes de d'évaporation et de diffusion (Mertz, 2001)

À l'inverse, la surface de la pierre C, et d'autant plus la surface de l'échantillon B3, sont exemptes de lichens, et ne contiennent pas non plus d'oxalates de calcium.

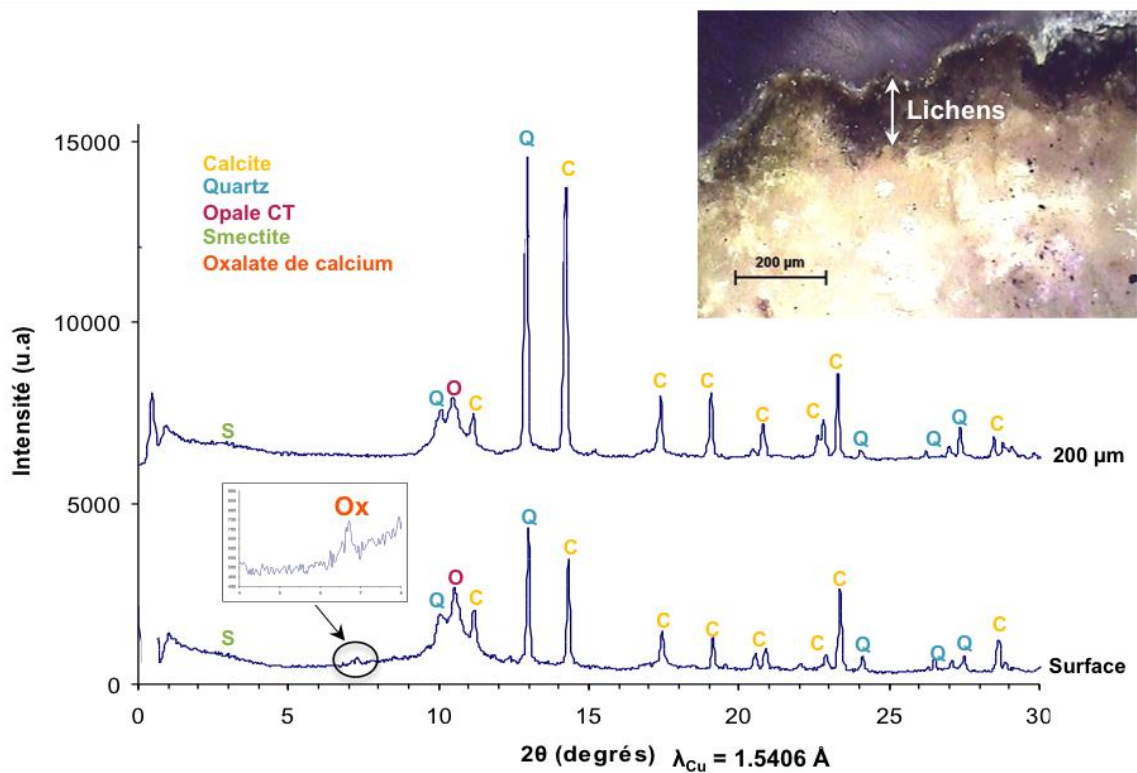


FIGURE 75 : DIFFRACTOGRAMME DE DRX SUR MASSIF A LA SURFACE DE L'ECHANTILLON ET A 200µm DE PROFONDEUR

2.2.1.2. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

L'état de surface de l'échantillon B3 est celui d'une pierre venant juste de se desquamer, contrairement aux autres échantillons dont la surface a plus longtemps subi l'influence directe de l'atmosphère extérieure. L'échantillon B3 sera donc préférentiellement abordé plus loin, lors de l'étude des échantillons selon un profil de profondeur. En revanche, il paraissait intéressant de comparer l'état de surface des autres échantillons entre eux, en dehors de la présence ou non de lichens, puis d'observer les différences entre l'état de surface et le cœur *a priori* sain qui est vu dans une fracture faite au centre de ces mêmes échantillons. Les morphologies de surface et les différences de textures ont été observées au microscope électronique à balayage¹¹⁹, et sont illustrée à la Figure 76 par le prélèvement C1 et par le prélèvement A2, représentatif des pierres A et B.

¹¹⁹ Microscope Electronique à Balayage de marque Hitachi-TM-1000, échantillons analysés sans préparation à une tension d'accélération de 15 KV en mode électrons rétrodiffusés

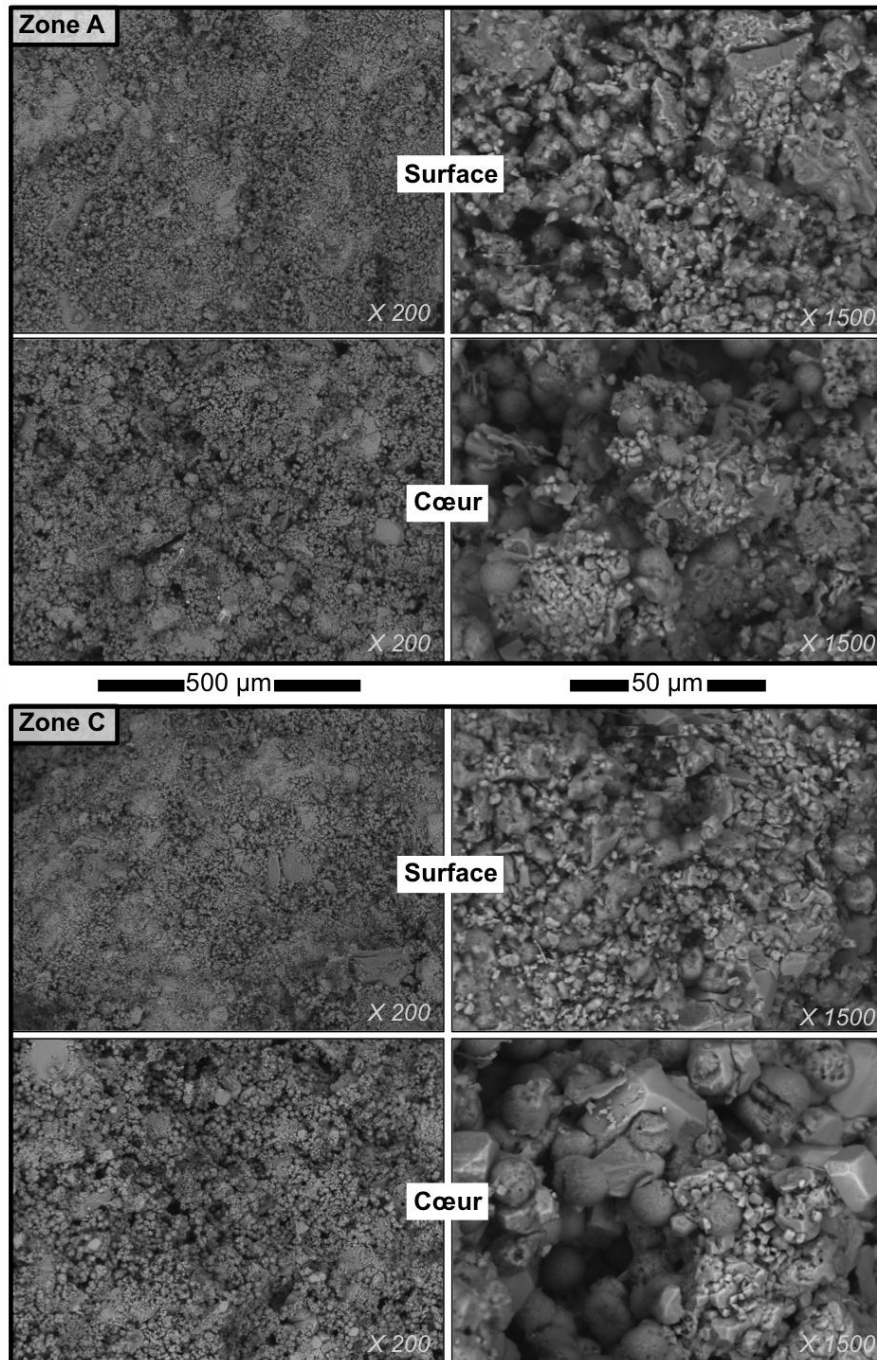


FIGURE 76 : MICROGRAPHIES MEB DE SURFACES NON POLIES, EN MODE ELECTRONS RETRODIFFUSES, REPRESENTANT LA MICROTEXTURE DES ECHANTILLONS A ET C EN SURFACE ET A CŒUR

On observe de fortes similitudes pour ces deux échantillons : un aspect de surface semblable et des textures à cœur également proches, avec la présence des principaux minéraux constitutifs du tuffeau : calcite, quartz et sphérules d'opales. Cependant, on observe une différence entre le cœur des échantillons et leur aspect de surface, où on remarque une accumulation de cristaux de calcite micritique légèrement plus importante que celle observée à

cœur des pierres saines. Ces cristaux de calcite sont localisés dans la porosité, qu'ils ont tendance à obstruer.

La surface de ces deux pierres s'est donc recouverte d'une patine, définie par B. Brunet-Imbault (1999) comme étant la « zone superficielle de la pierre subissant l'interaction entre la pierre et le milieu environnant [et présentant] des modifications de structure et/ou de composition minéralogique et chimique ». Le terme de patine correspond à la fois à la couche superficielle enrichie en calcite et indurée, mais également aux couches directement sous-jacentes, jusqu'à plusieurs millimètres d'épaisseur, dont la composition chimique et les propriétés ont été modifiées. Mais dans notre cas, la pierre observée directement sous la surface patinée présente une texture semblable avec le cœur sain de la pierre. Il aurait été intéressant de mesurer et d'exprimer de manière quantitative ces différentes morphologies, par une étude de porosité. Toutefois, la grande variabilité naturelle du tuffeau et la très faible taille des échantillons sélectionnés pour mesurer la porosité en surface ne permettent pas de garantir la représentativité des mesures de porosimétrie au mercure, ni l'estimation de tendances.

Enfin, ces observations permettent de constater que :

- Pour deux pierres dont la surface a été mise à nu et exposée à l'atmosphère à des dates différentes (XVI^e et XIX^e siècles), l'état de surface est comparable. La patine formée dans un environnement rural comme celui de Chambord se crée donc dans un temps relativement court, probablement inférieur à l'échelle du siècle, et reste ensuite stable dans le temps.
- Tant que la plaque n'est pas desquamée, l'état de surface de la pierre est indépendant du niveau de propagation de la fissure. Les surfaces des prélèvements A2 et B2, qui possèdent des fissures sous-jacentes plus ou moins avancées, sont identiques à celles des prélèvements A1 et B1 où aucune fissure n'a été détectée.

2.2.2. ANALYSE DU PROFIL SELON LA PROFONDEUR

Les prélèvements ont été réalisés dans l'objectif de visualiser les différents stades de développement de la desquamation en plaques, depuis une pierre saine, jusqu'à une pierre entièrement desquamée. C'est en profondeur de la pierre, autour de 1 cm, que se situe

l'essentiel des désordres à l'origine de la desquamation de la pierre. Il paraissait donc pertinent d'étudier la composition de la pierre suivant un profil de profondeur allant de la surface qui a été caractérisée, jusqu'à la pierre saine, à environ 8 centimètres de la surface, en passant par la zone de fracture.

2.2.2.1. DIFFRACTION DE RAYONS X

Les carottes ont toutes été analysées en diffractions de rayons X sur poudre, de la surface jusqu'au cœur, par un échantillonnage avec un pas de 2,7 mm. Ce pas a été sélectionné pour être resserré tout en sélectionnant suffisamment de matière pour les analyses, et en tenant compte de l'épaisseur de la scie. En plus des minéraux constitutifs du tuffeau, ces analyses mettent en évidence la présence de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) qui est un sel exogène à la pierre. Le gypse est détecté dans les premiers centimètres de la pierre, et sa répartition semble varier en fonction de la profondeur, comme l'illustre la Figure 77 montrant les diffractogrammes de diffraction de rayons X effectuée sur l'échantillon B2, représentatif de cette répartition. La diffraction de rayons X n'est que qualitative, et l'intensité des pics caractéristiques du gypse ne peut pas être directement reliée à la quantité de gypse présente dans l'échantillon. Cependant, c'est au niveau de la fracture située à environ 1 cm de profondeur que le pic à $11,6^\circ$ caractéristique du gypse est le plus intense. À partir de 2,5 cm de profondeur, le gypse n'est plus détecté par cette méthode. Cependant, le seuil de détection du gypse à la diffraction de rayons X est compris entre 0,3 et 0,5 % (voir annexe 5). Ainsi, même si le gypse n'est pas détecté, il peut être présent en très faible quantité.

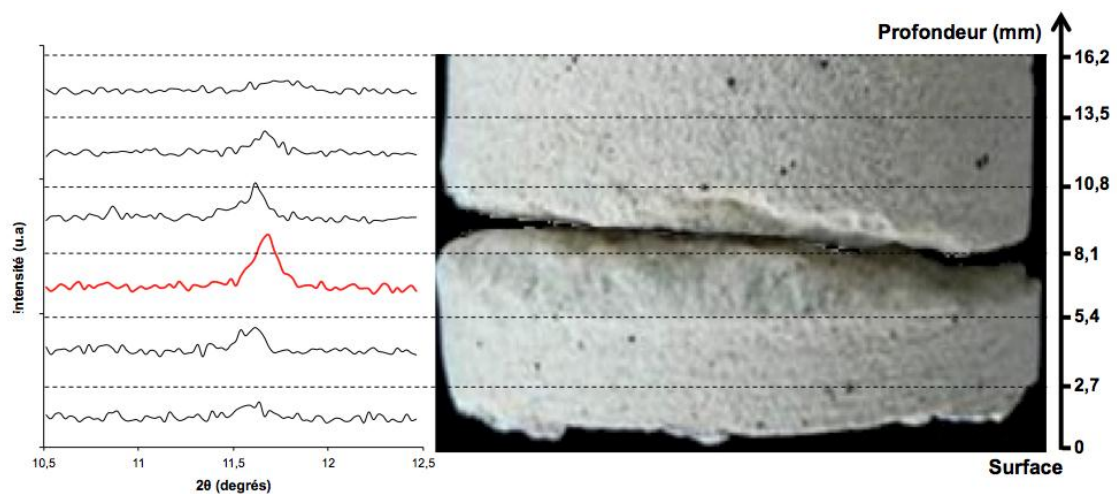


FIGURE 77 : DIFFRACTOGRAMMES DE DRX OBTENUS POUR L'ÉCHANTILLON B2 DE LA SURFACE VERS LA PROFONDEUR METTANT EN ÉVIDENCE LA PRÉSENCE DU PIC CARACTÉRISTIQUE DU GYPSE SITUÉ À $11,6^\circ$ (2θ CU)

2.2.2.2. CHROMATOGRAPHIE IONIQUE

Afin d'avoir une meilleure précision de mesure et des données quantitatives en fonction de la profondeur, des analyses de chromatographie ionique en phase aqueuse ont été réalisées selon le même pas d'échantillonnage qu'en DRX, soit tous les 2,7 mm¹²⁰. À une quantité de sulfates présente dans l'échantillon, il est possible de relier un pourcentage massique de gypse. Ainsi, une distribution de la teneur en gypse suivant la profondeur dans la pierre a pu être tracée (Figure 78).

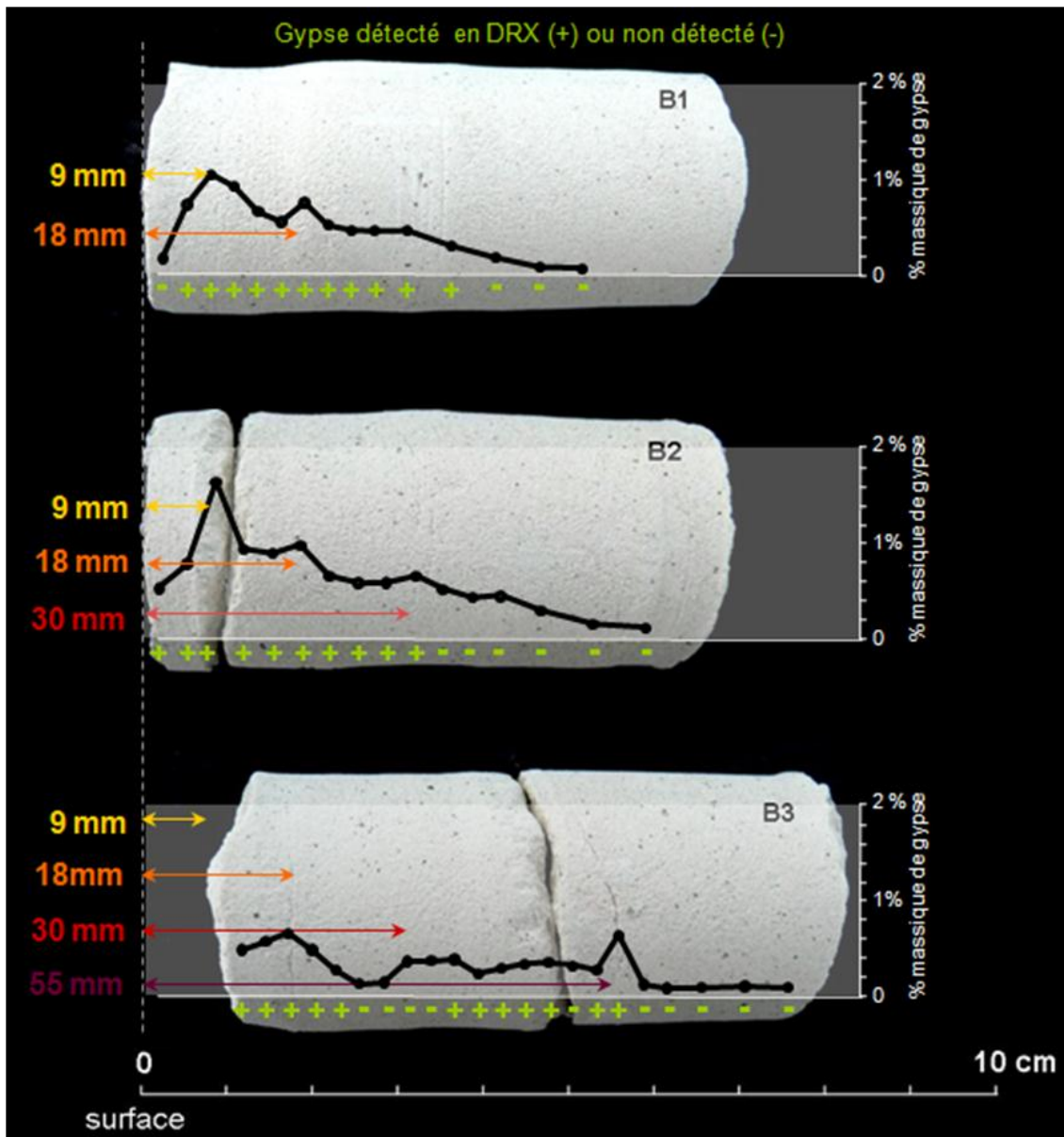


FIGURE 78 : REPRESENTATION DES TROIS ETATS D'AVANCEMENT D'UNE ALTERATION EN PLAQUES, PRELEVEE SUR LA TOUR DU CHAUDRON, AVEC MATERIALISATION DES FISSURES ET REPARTITION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DU POURCENTAGE MASSIQUE DE GYPSE DETECTE PAR CHROMATOGRAPHIE IONIQUE

¹²⁰ Le protocole de préparation et d'analyse des échantillons est présenté en annexe 6

La quantité de gypse en surface est quasi nulle. Que la fissure soit formée (B2) ou en cours de formation (B1), c'est au niveau de cette fissure, à 1 cm de profondeur environ, que la concentration en gypse est la plus importante (1,6 % pour l'échantillon B2). Dans le cas de l'échantillon B3, la pierre est déjà desquamée, la plaque est tombée et la surface mise à nu est pulvérulente. Du gypse est présent sur cette nouvelle surface qui était auparavant une zone de fissure, mais en moindre mesure par rapport aux deux autres échantillons, probablement parce que cette zone est maintenant soumise à l'action du lessivage des pluies et des ruissellements, et que l'aspect pulvérulent empêchant une bonne cohésion, la perte de matière (et donc de gypse) est donc inévitable. Lorsque d'autres réseaux de fissures se développent parallèlement à la surface, plus en profondeur, la concentration en gypse augmente de nouveau légèrement, avant d'être nulle au-delà de 6 cm de profondeur.

Les échantillons A1 et A2 montrent la même tendance que B1 et B2, les concentrations étant légèrement inférieures, autour de 0,7% massique de gypse au niveau de la première fissure, là où la teneur atteint son maximum. On notera donc le fait que plus la fissure principale située à 9 mm de profondeur est étendue, plus le pourcentage de gypse est important.

Un fait intéressant peut être remarqué pour l'échantillon C1. Cette pierre a subi plusieurs desquamations successives, et la surface pulvérulente mise à nu qui s'est ensuite repatinée correspond à la troisième fissure parallèle à la surface, à 3 cm de profondeur. Cet échantillon, dont le cycle de stabilisation vis à vis de son environnement a recommencé dès que la dernière plaque est tombée, contient également du gypse dont la répartition suit le même profil que pour les autres pierres : peu de gypse en surface, et un pic à environ 1 cm de la surface de l'échantillon (0,7 % massique), bien qu'aucune fissure ne soit encore formée, comme cela a été remarqué pour A1 et B1.

Ces mesures sont en accord avec des études précédentes montrant cette répartition du gypse en profondeur (Félix, 1985 ; Jeannette, 1985 ; Cautru, 1976), même si la quantification de ce gypse n'est pas toujours faite. Pochon (1968), évoque des teneurs de 1 à 2 % massique de gypse au niveau de la fissure en contexte rural, soit des teneurs comparables avec celles mesurées sur la tour du Chaudron.

Wendler *et al.* (1990) caractérisent ce même profil de concentration en sels dans des altérations en plaques sur des grès et des calcaires, et corrélient numériquement cette quantité de sels avec la zone de la pierre contenant le maximum d'humidité et le minimum de

cohésion. C'est donc dans cette zone où il y a le maximum de teneur en eau que les sels pourraient s'accumuler, et que se situerait la fissure (Vergès-Belmin, 2001 ; Pauly, 1990).

2.2.2.3. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

L'analyse quantitative a permis d'observer la distribution du gypse en fonction de la profondeur de la pierre. Les observations des échantillons en microscopie électronique à balayage permettent d'observer la localisation du gypse en fonction de l'espace poral et des constituants de la pierre, notamment au niveau des zones de fissure. C'est au niveau de l'emplacement de la première fissure, à 9 mm de profondeur, que les observations ont été faites. La pierre est extrêmement pulvérulente et peu cohésive dans cette zone, comme le montre la Figure 79. Les cristaux de gypse identifiés sont en forme de fer de lance, et sont agglomérés aux autres minéraux, qui eux sont constitutifs du tuffeau. Ces derniers ne semblent d'ailleurs pas avoir subi de dommages.

Il a été plus difficile de détecter et de localiser les cristaux de gypse au niveau du réseau de fissures de l'échantillon B2 comparé à l'échantillon A1, bien que dans ce dernier, la quantité de sulfates mesurée en chromatographie ionique soit deux fois moins importante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la pierre A n'est pas encore desquamée et que le réseau de fissure sous surface est abrité et isolé de l'extérieur, alors qu'une partie de la pierre B est déjà desquamée, juste sous la zone du prélèvement B2, la fissure et la pierre pulvérulente étant donc plus exposées. Cette différence a pu engendrer des pertes de matières plus importantes sur l'échantillon B2 que sur l'échantillon A2, avant ou pendant le prélèvement par carottage. Cette donnée nous permet d'envisager le fait que les teneurs en gypse mesurées en chromatographie ionique sont des teneurs *a minima* du gypse réellement présent au moment où la fissure est la plus étendue, juste avant que la plaque tombe.

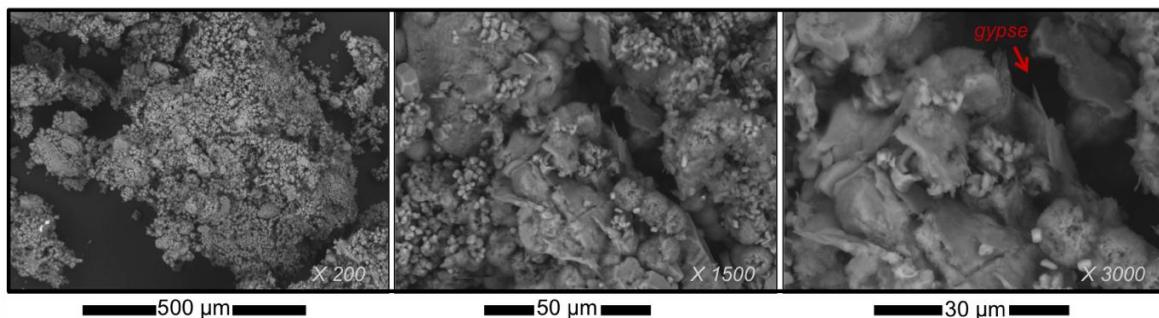


FIGURE 79 : LOCALISATION ET MORPHOLOGIE DES CRISTAUX DE GYPSE DANS LA POROSITE PAR OBSERVATION AU MEB

Selon J.-P. Cautru (1976), le gypse est localisé à la surface des feuillets qui composent la fissure, et donne l'impression d'avoir cristallisé dans les espaces existants générés par la fissure et qu'il « ne s'est pas introduit de force dans les pores ». Les cartographies MEB-EDX de répartition des éléments principaux recherchés (Si, Ca et S) qui se trouvent à la Figure 80 tendent à démentir cette impression. En effet, après observation au MEB de l'ensemble du profil de la pierre depuis la surface jusqu'à 2 cm de profondeur sur des sections polies, il semblerait que le gypse est concentré principalement au niveau de la fissure. Toutefois, il n'est pas situé uniquement sur les lèvres de la fissure, mais il est intimement lié et imbriqué aux autres constituants de la pierre, au niveau de ce réseau de fissures. La cartographie montre clairement que les cristaux de gypse se sont développés entre des sphérules d'opale et un mica (la présence d'aluminium et de potassium confirme cette identification).

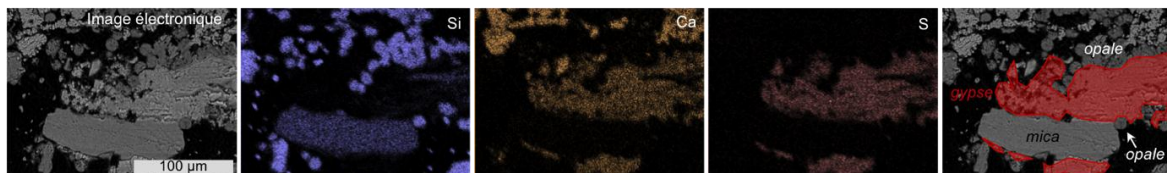


FIGURE 80 : CARTOGRAPHIE MEB-EDX DE REPARTITION DES ELEMENTS (SI, CA, S) DANS LA FISSURE DE L'ECHANTILLON B2

On note aussi la présence des cristaux de gypse sur l'échantillon B1, dans le prolongement théorique de la fissure, à 9 mm de profondeur. Comme pour l'échantillon B2, la Figure 81 montre la disposition des cristaux de gypse au sein de la texture de la pierre.

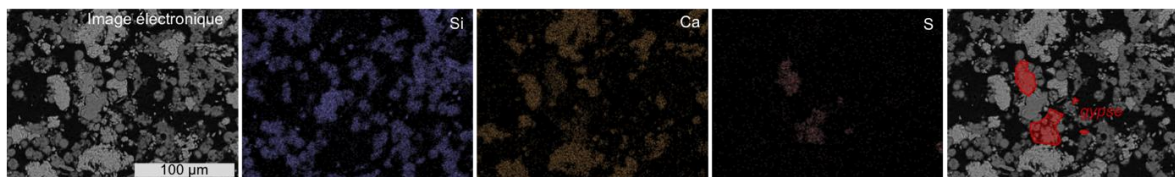


FIGURE 81 : CARTOGRAPHIE MEB-EDX DE REPARTITION DES ELEMENTS (SI, CA, S) AU NIVEAU DE LA FISSURE THEORIQUE DE L'ECHANTILLON B1

2.3. ANALYSES COMPLEMENTAIRES

Afin de s'assurer que les résultats obtenus à partir des prélèvements de la tour du Chaudron étaient généralisables et représentatifs du reste du château, d'autres prélèvements ont été réalisés de manière ponctuelle sur des zones présentant des morphologies de desquamations semblables à celles observées : les desquamations en plaques, sur les

parements exposés, sont formées de plaques simples ou multiples, dont la première fissure se situe à environ 1 cm de la surface.

Ces prélèvements ont d'abord concerné l'aile Sud, dont le contexte historique est connu, puis d'autres zones du château afin de couvrir des altérations semblables qui se sont développées dans diverses orientations et divers environnements.

2.3.1. LOCALISATION DES PRELEVEMENTS COMPLEMENTAIRES

En raison du faible nombre de zones altérées et de sa grande visibilité par le public, il n'a pas été possible de réaliser des prélèvements par carottage sur l'aile Sud, comme cela a été fait pour la tour du Chaudron. Ce sont donc des prélèvements de poudre qui ont été réalisés, au niveau de desquamations en plaques les plus étendues, sur des tuffeaux que l'on sait être d'origine (Figure 82).

Les prélèvements concernent des desquamations en plaques qui se sont développées sur des tuffeaux d'origine dont les pierres adjacentes ont été remplacées en pierre de Richemont (voir chapitre 2). La pierre a été grattée en surface de la plaque, puis sous la plaque au niveau de la fissure (en partie supérieure de la desquamation, pour limiter tout risque d'infiltration d'eau dans la fissure), et enfin au niveau d'une zone pulvérulente déjà desquamée et à l'air libre.

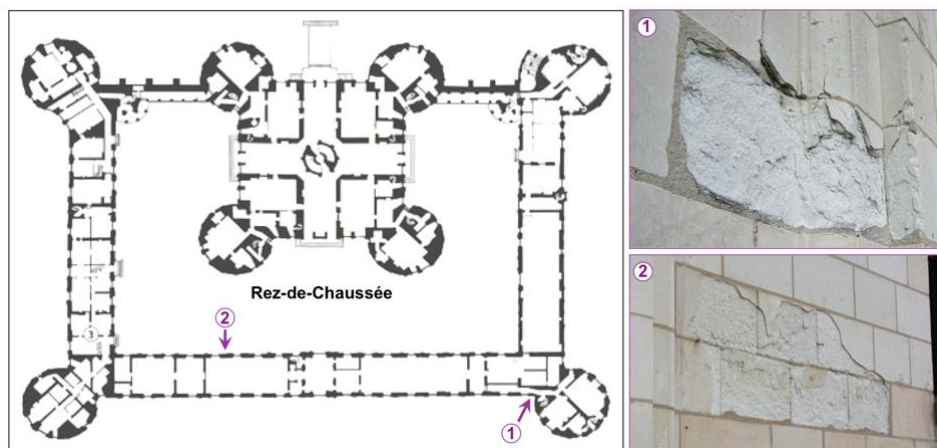


FIGURE 82 : LOCALISATION SUR LE PLAN DU REZ-DE-CHAUSSEE DU CHATEAU, DES PRELEVEMENTS REALISES SUR L'AILE SUD

Mêmes si l'histoire des pierres prélevées sur le reste du château n'est pas connue avec autant de certitudes que celles de l'aile Sud et de la tour du Chaudron, cette campagne de

prélèvement concerne uniquement des tuffeaux présumés d'origine. Pour le reste du château, le même mode opératoire que pour l'aile Sud a été utilisé (Figure 83). L'objectif est de compléter les analyses précises réalisées sur la tour du Chaudron et l'aile Sud, et de s'assurer que les conclusions formulées peuvent être généralisables à l'ensemble du château, quels que soient l'emplacement et l'orientation de l'altération.

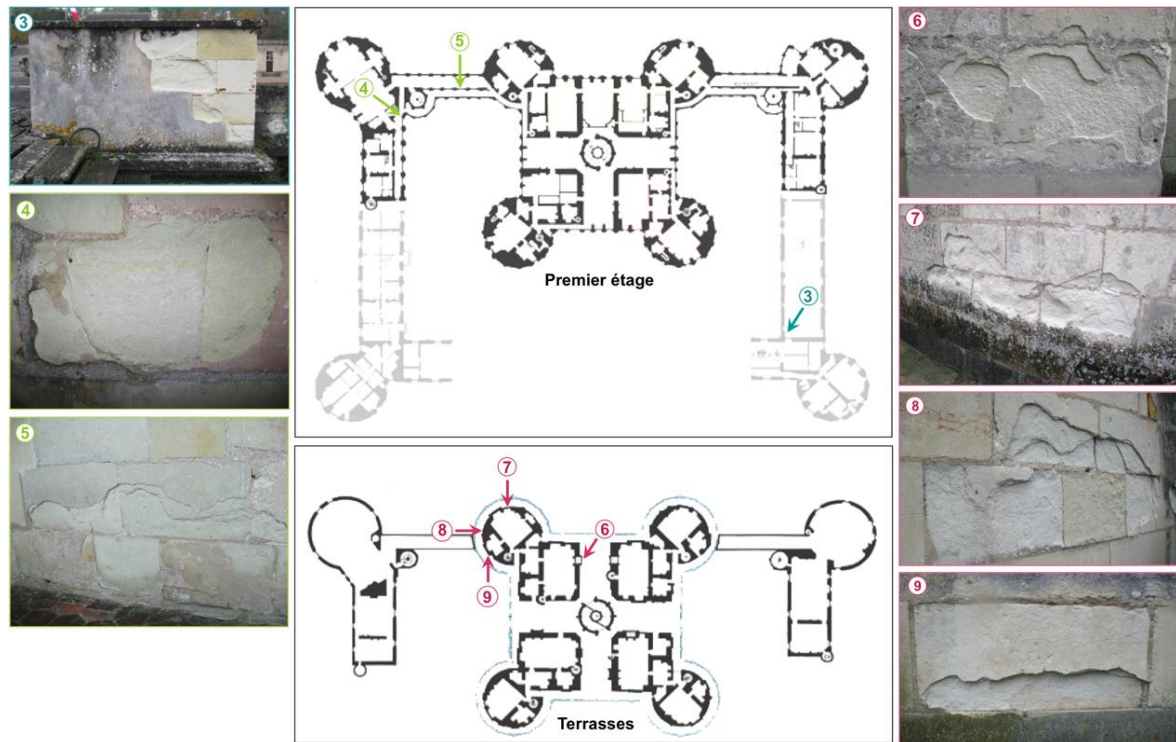


FIGURE 83 : LOCALISATION SUR LE PLAN DU PREMIER ETAGE ET CELUI DES TERRASSES DU CHATEAU, DES PRELEVEMENTS COMPLEMENTAIRES REALISES

Trois catégories d'altérations ont été sélectionnées :

- Une desquamation en plaques située juste au-dessus des terrasses en béton de l'enceinte basse, dont le départ de desquamation a été recouvert de ciment (zone 3)
- Des desquamation en plaques situées dans des zones abritées de l'action directe des pluies et du vent, à l'inverse des altérations classiquement rencontrées. Ces zones sont situées dans des corridors intérieurs, proches d'arcades de baies ouvertes (zone 4) ou proches d'arcades de baies aujourd'hui vitrées, mais qui ne l'ont pas toujours été dans l'histoire du château (zone 5)

- Des desquamations en plaques situées sur les terrasses du donjon, dans les parties les plus hautes du château, et orientées dans différentes directions (zones 6, 7, 8 et 9)

2.3.2. ANALYSE DE LA PRESENCE ET DE LA LOCALISATION DU GYPSE

Les différents prélèvements effectués, uniquement sous forme de poudres, ont été analysés en diffractions de rayons X sur poudre dans un premier temps, puis préparés pour être analysés en chromatographie ionique.

Quelle que soit la zone analysée, il est intéressant de remarquer que les résultats sont comparables d'une zone à l'autre, et peuvent être résumés par l'exemple présenté en Figure 84.

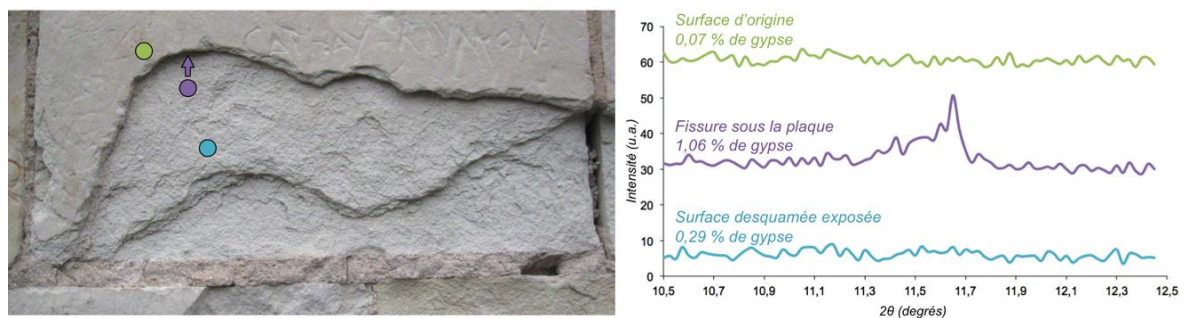


FIGURE 84 : RESULTATS DE CARACTERISATION OBTENUS EN DIFFRACTION DE RAYONS X ET DONNEES QUANTITATIVES OBTENUES PAR CHROMATOGRAPHIE IONIQUE POUR LES PRELEVEMENTS DE LA ZONE 8

Pour l'ensemble des prélèvements, trois zones distinctes peuvent être identifiées :

- la surface extérieure de la pierre qui ne contient pas des quantités significatives de gypse,
- la zone située au niveau du réseau de fissure, à l'abri de la plaque non encore desquamée, qui contient des quantités significatives de gypse, comparables avec celles mesurées sur les échantillons de la tour du Chaudron,
- la surface déjà desquamée de la pierre, où l'aspect pulvérulent est exposé à l'atmosphère depuis une durée indéterminée, qui contient de faibles quantités de gypse.

Que ce soit dans les zones abritées (zones 4 et 5) ou non, on remarque que la zone pulvérulente déjà desquamée contient moins de gypse que celle sous la plaque non encore

desquamée. La plus grande part de gypse présent dans la fissure se trouve donc dans cette zone pulvérulente, où les pertes de matières sont fréquentes une fois que la plaque est tombée car cette zone devient alors plus exposée au milieu extérieur. Ces pertes de matières (et donc de gypse) peuvent être dues à l'action du lessivage par les eaux de pluie ou de ruissellement, à l'action du vent, ou encore à l'action anthropique (passage de visiteurs, nettoyage et entretien).

2.4. BILAN SUR LA CARACTERISATION DE LA DESQUAMATION EN PLAQUES

Les caractérisations physico-chimiques réalisées dans ce chapitre conduisent à plusieurs conclusions, reliant systématiquement le gypse et les fissures :

- La desquamation en plaques n'est pas synonyme d'une seule fissure à environ 1 cm de la surface, d'autres fissures peuvent se développer en même temps à d'autres profondeurs
- La concentration de gypse dans l'échantillon augmente de la surface à la première fissure située à environ 1 cm de la surface, puis décroît progressivement avec la profondeur
- Chaque fissure en profondeur est corrélée à une augmentation locale de la teneur en gypse
- Plus la fissure est élargie, et donc plus la plaque est prête à tomber, plus la teneur en gypse est importante
- Le gypse peut se développer à l'endroit où une fissure n'est pas encore apparue mais pour laquelle la susceptibilité d'apparition est forte

On peut donc se demander si le gypse peut être responsable de la formation de la plaque. Les auteurs qui évoquent son rôle dans ce phénomène ne font que des suppositions et ne proposent pas de mécanisme clair à ce sujet. La première étape avant de pouvoir proposer une explication à la présence de gypse est l'identification de son origine.

2.5. QUESTIONNEMENTS SUR LE RÔLE DE LA COMPATIBILITÉ PIERRE DE RICHEMONT/PIERRE DE TUFFEAU DANS LE PHÉNOMÈNE DE DESQUAMATION EN PLAQUES

En dehors de toute notion de minéral exogène, présent ou non, il est intéressant de noter l'emplacement des desquamations en plaques étudiées, représentatives des desquamations observées sur l'ensemble du château. Elles sont généralement situées à proximité directe de pierres remplacées, le plus souvent en calcaire de nature différente du tuffeau, comme de la pierre de Richemont (zones 1, 2, 3, 6, 7, 8 et 9). Ce sont généralement les parties basses qui ont été remplacées, et l'altération en plaques se développe au-dessus. Ce fait avait déjà été mis en évidence dans le chapitre précédent, bien que la relation entre les deux n'ait pu être établie.

L'hypothèse la plus probable, issue des observations effectuées au chapitre 4, est que l'altération a commencé par le bas du mur, là où l'eau (et éventuellement les polluants) s'accumulent. Les pierres ainsi desquamées ont été remplacées. Mais la fissure s'était déjà sans doute propagée aux pierres du dessus même si aucune altération en surface n'était encore visible. L'altération a continué sa progression et a ensuite conduit à la desquamation progressive des pierres au-dessus de celles remplacées. Il est difficile de dire si le remplacement de pierres a aggravé et accéléré la desquamation en plaques ou si le processus de desquamation a simplement suivi son cours normal. Mais *a priori*, le remplacement de pierres n'est pas le facteur déclencheur puisque dans le cas des zones 4 et 5, les desquamations se développent à la base des murs, sans remplacements de pierres. C'est sans doute comme cela qu'ont débuté les autres desquamations citées plus haut.

La juxtaposition de ces deux natures de pierre au sein même du parement pose la question de la compatibilité entre elles et du rôle que pourrait avoir la pierre de Richemont dans l'altération en plaques du tuffeau. Une compatibilité correcte entre deux pierres est définie par Dessandier (2000) comme étant le cas où aucune altération différentielle ne se manifeste dans le temps entre deux pierres. Cette compatibilité est quantifiée par le calcul d'un indice qui permet d'évaluer la part de plusieurs paramètres pour chacune des deux pierres : comportement des minéraux en présence d'eau, propriétés de stockage et de transfert des fluides et résistance mécanique. Le calcul de cet indice semble mettre en évidence la compatibilité moyenne à très moyenne entre la pierre de Richemont et la pierre de tuffeau.

Derbez (1999) propose une hypothèse pour expliquer l'altération par desquamation que l'on observe sur les tuffeaux situés aux abords d'assises remplacées en pierre de Richemont,

dans le cas de la cathédrale Saint-Gatien de Tours. À la vue des propriétés des deux pierres, il estime que le tuffeau s'imbibe beaucoup plus que la pierre de Richemont lors des épisodes de pluie, et que cette eau contenue dans la pierre peut migrer dans les moellons, mais être stoppée par les moellons de pierre de Richemont. Les solutions, qui contiennent des sels, s'accumulent alors dans ces tuffeaux dans de plus grandes proportions que dans d'autres tuffeaux plus éloignés des pierres de Richemont, et lors du séchage, ces sels cristallisent en plus grande quantité. La pierre de Richemont aurait alors un effet aggravant sur la formation de la plaque par cristallisation de sels.

Cependant, dans l'état actuel des observations et de caractérisations, il n'est pas possible d'affirmer que la pierre de Richemont joue un rôle dans le processus de desquamation en plaques du tuffeau.

3. UN AUTRE EXEMPLE D'ALTÉRATION : LES DESQUAMATIONS EN FEUILLETS

Les caractérisations réalisées sur la tour du Chaudron et sur le reste des pierres du château montrent la constante présence du gypse au niveau de la fissure située à environ 1 cm de profondeur dans le cas des desquamations en plaques. Peu souvent étudiée, la desquamation en feuillets peut toutefois apporter de précieux renseignements dans le cadre de cette étude, afin de compléter le diagnostic de la desquamation en plaques.

3.1. ÉTAT DE L'ART

Dans la littérature, plusieurs hypothèses ont été formulées concernant les mécanismes de formation des desquamations en plaques. Les desquamations en feuillets, observées notamment en contexte rural, sont parfois décrites conjointement aux desquamations en plaques, comme une forme ou une étape de l'altération en plaques et non comme une forme d'altération à part entière (Rigo, 1990 ; Cautru, 1976). De plus, leurs mécanismes de développement sont rarement explicités. Dans le cas de l'étude d'altérations de monuments

en tuffeau, on leur accorde souvent un rôle secondaire, sans doute en raison de leur localisation, car elles sont moins visibles, et du fait que leur morphologie n'est pas clairement différenciée de celle des desquamations en plaques.

On leur trouve néanmoins des caractéristiques bien différentes, notamment au niveau de leur morphologie à l'aspect feuilleté. Ces feuillets multiples sont localisés en surface de la pierre alors que les desquamations en plaques sont caractérisées par une surface apparemment saine avec un réseau de fissures sous-jacentes localisé à une profondeur d'environ 1 cm. De plus, généralement situées dans des zones abritées, les desquamations en feuillets semblent se développer à la faveur d'un séchage beaucoup plus lent que les desquamations en plaques, qui sont positionnées dans des zones exposées (voir chapitre 3).

À la différence de la desquamation en plaques, le développement d'une desquamation en feuillets est systématiquement attribué à la présence de sels solubles, principalement le gypse (Jeannette *et al.*, 1985 ; Cautru, 1976). Les sels présents dans la pierre sont responsables d'éclatements générant de fines écailles et feuillets en surface, au moment de leur cristallisation lors du séchage. Ce séchage n'est pas suffisamment lent pour ne générer que des efflorescences en surface, ni suffisamment rapide pour développer des desquamations en plaques, ce qui est le cas pour les pierres exposées des parements. Les proportions de sels mesurées sont généralement plus importantes dans les desquamations en feuillets qu'au niveau de la fissure dans la desquamation en plaques. Ces desquamations en feuillets peuvent se développer sur d'autres calcaires que les tuffeaux, comme par exemple les calcaires micritiques de l'église Notre-Dame-La-Grande à Poitiers décrits par Hammecker (1987). L'altération principale de la pierre de Caen est également une desquamation en feuillets, reliée à la présence de gypse, systématiquement présent entre les feuillets (Samson-Gombert, 1993).

Enfin, bien que ce ne soit pas l'unique facteur, la formation de desquamations en feuillets peut parfois être en partie due à la pose d'une pierre en délit (erreur de pose), ou bien se développer le long du litage lorsque, pour des raisons techniques, la pose de la pierre se fait selon un litage vertical (éléments sculptés verticaux). Ces dispositions de pierres sont donc un facteur aggravant qui favorise l'exfoliation, la formation de feuillets, sous l'effet de cristallisation de sels. Sous l'action de cycles de gel-dégel, la pierre peut également se desquamer en feuillets, dont les effets sont accentués par la pose de pierre en délit (Bigas et Martinet, 2009). Il n'y a pas de présence de gypse dans ce cas précis.

3.2. LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS

À partir des relevés d'altération effectués sur l'aile Sud et la tour du Chaudron et présentés au chapitre 3, trois zones principales ont été sélectionnées pour représenter les différents développements typiques de la desquamation en feuillets (Figure 85) :

- les feuillets localisés sous le stylobate, sur un tuffeau d'origine (f1)
- les feuillets localisés sous le stylobate, sur un tuffeau remplacé il y a moins de 40 ans (f2)
- les feuillets localisés sur les balustres des rambardes en pierre de Richemont posées en 1964 (f3)

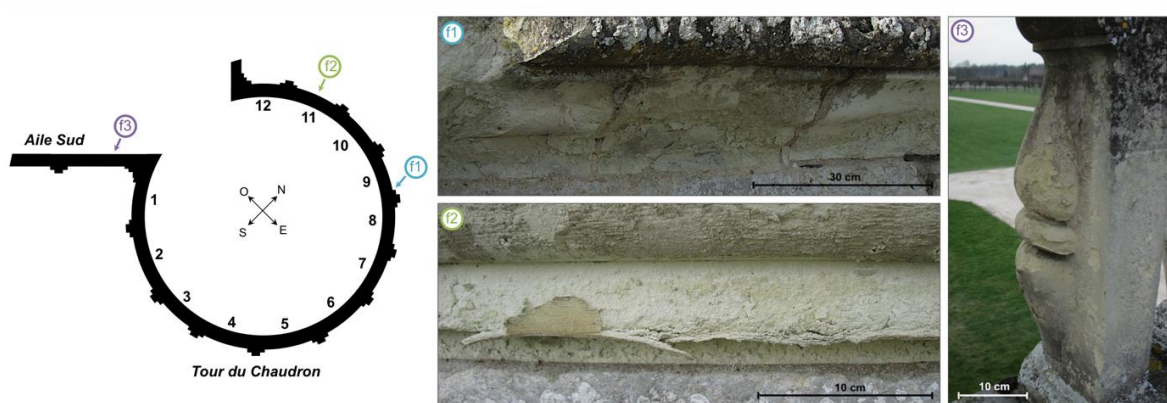


FIGURE 85 : LOCALISATION DES DESQUAMATIONS EN FEUILLETS PRÉLEVÉES SUR LA TOUR DU CHAUDRON ET L'AILE SUD

Ces altérations engendrent une grande pulvérulence et une faible cohésion de la pierre, il n'a donc pas été possible de réaliser des prélèvements sous forme de carottes. Ce sont des fragments de feuillets se détachant aisément et des poudres à différentes profondeurs qui ont été prélevés. Les écailles prélevées mesurent moins d'un centimètre d'épaisseur, et présentent une face externe indurée, et une face interne très pulvérulente. La zone altérée sous-jacente à l'écaille a ensuite été grattée pour récolter de la poudre plus en profondeur.

Comme pour l'étude des desquamations en plaques, ces zones ont été complétées par des prélèvements réalisés dans le reste du château pour confirmer les analyses obtenues (Figure 86). Le prélèvement f4 est situé sous un stylobate, comme pour les prélèvements f1 et f2, et les prélèvements f5 et f6 ont été faits dans des zones abritées au niveau d'escaliers ou de passages couverts, sur les terrasses du château.

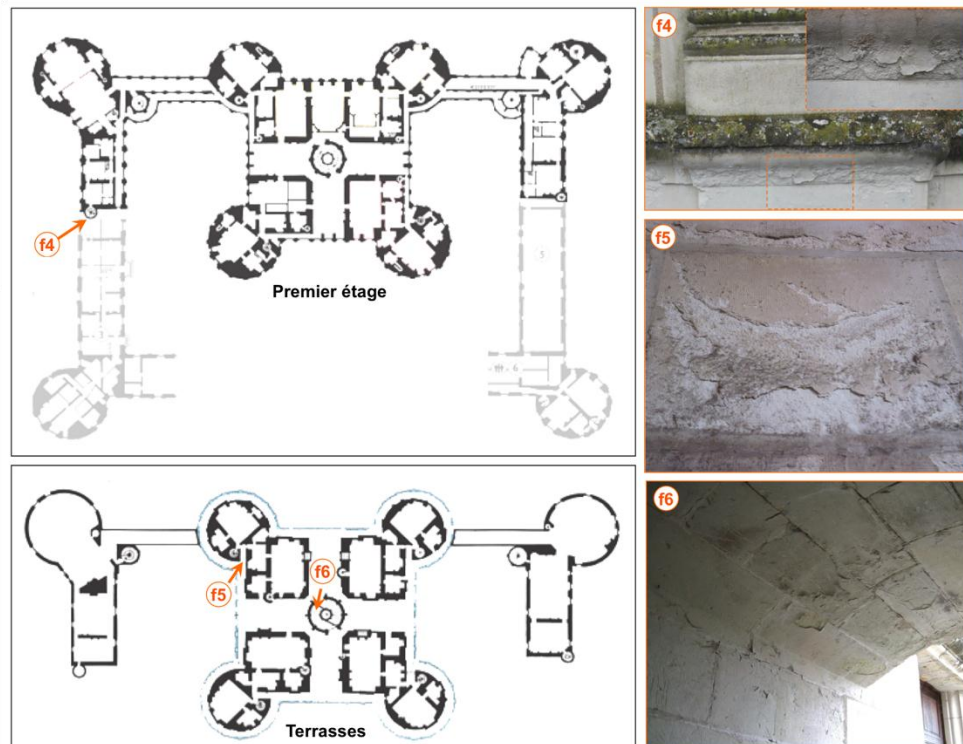


FIGURE 86 : LOCALISATION DES PRELEVEMENTS DE DESQUAMATIONS EN FEUILLETS SUR LE RESTE DU CHATEAU

3.3. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Toutes les zones analysées présentent des résultats comparables, peu important l'emplacement de l'altération, la date de pose de la pierre, ou la nature de la pierre.

La texture pulvérulente et friable, et la faible épaisseur des feuillets prélevés n'ont pas permis de réaliser des mesures de diffraction de rayons X et de chromatographie ionique selon la profondeur avec un pas aussi régulier que pour les desquamations en plaques. Toutefois, dans tous les prélèvements, l'analyse a révélé que du gypse était systématiquement présent dans les feuillets et dans la pierre sous-jacente, à des teneurs comprises entre 5 et 10 % massique, ce qui est bien souvent mesuré dans les dégradations par desquamations en feuillets (Brunet *et* Oriol, 1992). Les mesures en chromatographie ionique n'ont révélé que des sulfates, et n'ont pas mis en évidence une quantité significative de chlorures et de nitrates dans les échantillons.

Les observations au microscope électronique à balayage ont permis de localiser les cristaux de gypse plus précisément (Figure 87). Lorsque l'on observe l'écaille supérieure de la

desquamation en feuillets, on constate que ces cristaux sont localisés en très grande quantité à la surface de la pierre. Ils ne ressemblent pas à ceux observés dans la fissure des plaques, ils sont cette fois plus petits et arrondis, en forme de grain de riz. Comme pour les patines de calcite micritique observées à la Figure 76, les cristaux de gypse semblent obstruer de manière homogène la porosité en surface. L'observation de cette même écaille d'épaisseur submillimétrique dans sa partie inférieure permet de constater qu'il n'y a que très peu de gypse. Enfin, l'observation de l'interface entre deux feuillets, montre une hétérogénéité des résultats car certaines zones contiennent du gypse et d'autres non. L'observation évoquée au sujet de la zone de fissure des plaques semble valable dans le cas des feuillets : le gypse se situe aux abords de la zone de fissure entre les feuillets qui sont très minces. La perte de matière est donc facilitée. Félix (1985), observe cette même répartition du gypse sur des grès, et lui attribue le rôle principal dans le développement de ces desquamations en feuillets.

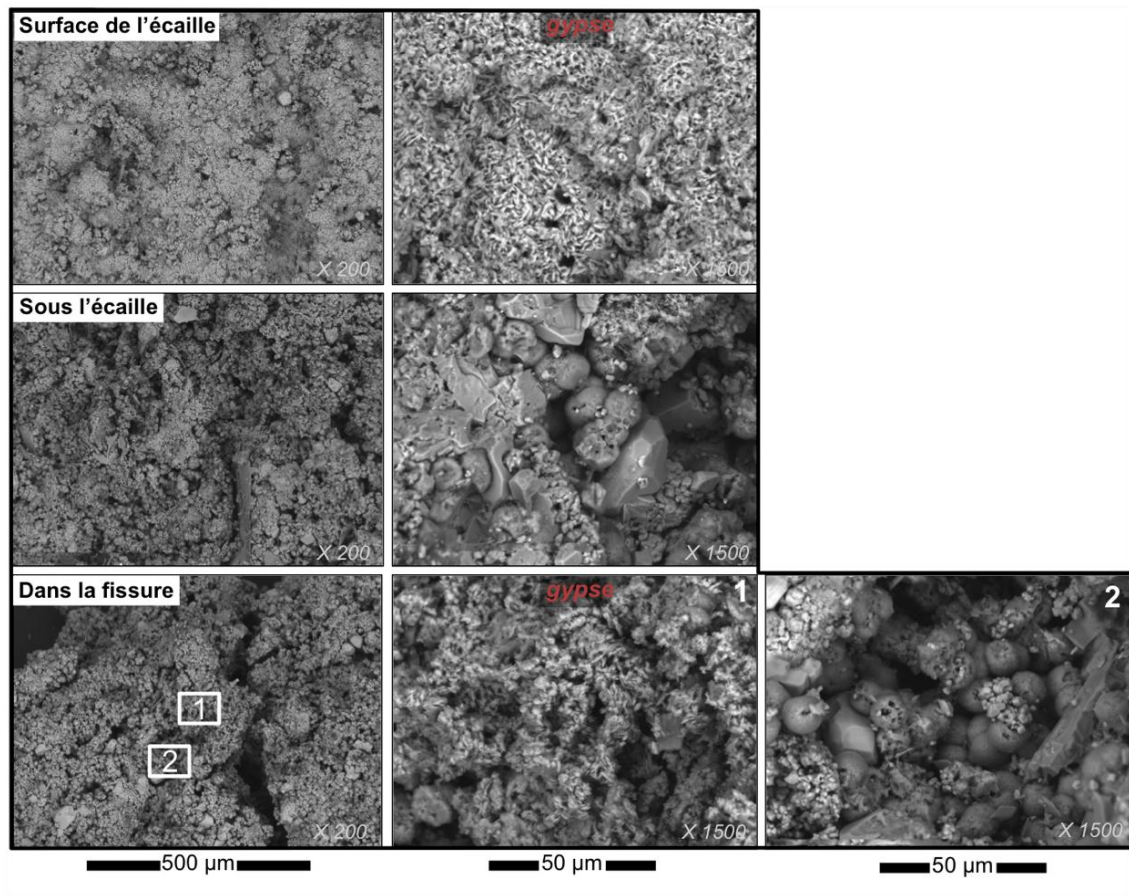


FIGURE 87 : LOCALISATION DES CRISTAUX DE GYPSE D'UNE DESQUAMATION EN FEUILLETS PAR OBSERVATION AU MEB

Comme nous l'avons vu précédemment, les desquamations en plaques au château de Chambord n'affectent que les tuffeaux, alors que les desquamations en feuillets affectent plusieurs natures de calcaires à grains fins, principalement des tuffeaux et des pierres de

Richemont. Malgré la présence de sels comme le gypse dans les deux formes d'altération, les desquamations en plaques et les desquamations en feuillets ne se développent pas dans les mêmes conditions environnementales. Les causes à l'origine de ces dégradations ne sont donc sans doute pas les mêmes et il convient de les différencier, à l'inverse de beaucoup d'études qui ont tendance à les assimiler.

Il semblerait que les causes de la desquamation en feuillets soient bien la présence de gypse et le confinement dans une zone abritée des pluies. La description de ces deux facteurs d'altération correspond à la description d'une autre forme d'altération cette fois largement étudiée : les croûtes noires qui se développent en environnement urbain. En effet, ces encroûtements noirs se développent dans des zones abritées des pluies et des ruissellements (sous les corniches par exemple), qui permettent l'accumulation de sels et de particules à la surface de la pierre (Beck, 2006 ; Thomachot, 2002 ; Camuffo, 1995 ; Jeannette, 1992 ; Lefèvre, 1992). Sous cette croûte noire, composée principalement de cendres volantes et de microsuies carbonées agglomérées par des cristaux de gypse, peut parfois se trouver une couche de gypse épigénique, épaisse d'1/2 millimètre environ (Verges-Belmin, 2001). Ce n'est pas une couche superposée à la surface de la pierre comme la croûte noire, mais une couche qui fait partie intégrante de la pierre, où le gypse a remplacé la calcite, et où les éventuelles traces d'outils sont visibles sur la pierre, comme on peut le voir sur l'échantillon 2 prélevé sur la tour du Chaudron (Figure 85). Enfin, sous cette mince pellicule de gypse se trouve une pierre pulvérulente et peu cohésive, parfois sur plusieurs centimètres, qui se desquame en feuillets entre lesquels se trouvent des cristaux de gypse (Török, 2003 ; Lazzarini et Tabasso, 1989 ; Félix, 1985). À l'exception de la croûte noire supérieure dont la présence est due à l'atmosphère urbaine polluée, la morphologie du reste de l'altération correspond à celle observée sur les feuillets présents au château de Chambord. L'emplacement préférentiel où se développent les croûtes noires correspond également à celui observé pour les desquamations en feuillets. On peut penser que si Chambord était situé en atmosphère urbaine, les zones de feuillets relevées et cartographiées seraient recouvertes de croûtes noires.

Que dire de la situation du château de Chambord, situé au cœur d'un parc de treize kilomètres de diamètre en pleine Sologne ? Même si les particules noires spécifiques à une atmosphère urbaine sont absentes, la présence de polluants atmosphériques est-elle possible ? D'où provient ce gypse présent dans les desquamations en plaques et en feuillets ? Comment expliquer les fortes proportions de gypse mesurées dans les desquamations en feuillets ? La suite de ce chapitre tente d'apporter des réponses à ces interrogations.

4. LE GYPSE DANS LES FORMES D'ALTERATION OBSERVEES

La bibliographie est très fournie en ce qui concerne les provenances possibles du gypse ou des composés soufrés qui peuvent être à l'origine de sa formation. La majorité de ces hypothèses de provenances annonce qu'elles sont extérieures à la pierre, et qu'elles concernent l'environnement de l'édifice, et notamment la pollution atmosphérique. D'autres provenances possibles sont localisées à une échelle plus petite, et concernent l'environnement proche de la pierre, que ce soient des sources naturelles comme les colonisations biologiques ou la nature de la pierre elle-même, ou bien des sources anthropiques comme les mortiers ou les produits de restauration qui l'entourent. Chaque possibilité de source sera présentée et sa vraisemblance sera évaluée et discutée en fonction des caractérisations précédemment présentées et celles réalisées en complément.

4.1. ORIGINE POSSIBLE DU GYPSE : LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Le soufre présent naturellement dans l'environnement peut provenir de l'activité volcanique, de l'érosion du sol contenant des sulfures métalliques, du gypse comme minéral naturel, ou encore de la synthèse de composés organiques par le plancton océanique. Bien que les aérosols marins aient été mis en cause à une hauteur de 10% de la teneur en soufre de l'atmosphère dans le cas de la ville de Tours (Derbez, 1999), c'est en grande partie l'activité humaine qui est responsable de la plus grande part de production de soufre et de son rejet dans l'atmosphère.

Lazzarini et Tabasso (1989) ont récapitulé l'ensemble des réactions à l'origine de la production de gypse. La principale source de pollution dans l'atmosphère est le dioxyde de soufre, ou anhydride sulfureux (SO_2), qui résulte de l'oxydation du soufre contenu en diverses quantités dans les combustibles liquides ou solides comme le charbon, le fioul ou le pétrole par exemple, libéré durant la combustion. Ce gaz est stable à l'état sec, mais extrêmement réactif en présence d'eau. Il réagit notamment avec l'eau et l'oxygène pour former de l'acide sulfurique H_2SO_4 . Ce composé sous forme liquide peut ensuite réagir avec la calcite de la pierre, pour former du gypse. Les sources de gypse dans le cas de la pollution atmosphérique sont principalement ces deux composés, gazeux pour le SO_2 , et liquide pour le H_2SO_4 , dont

les teneurs sont généralement quantifiées. Leurs mécanismes de formation seront explicités plus en détails dans le chapitre 6.

La production d'acide sulfurique et donc la formation de gypse seraient maximales en hiver, puisque c'est à cette période de l'année que l'émission de polluants est la plus importante (principalement à cause du chauffage qui entraîne une combustion plus importante de combustibles fossiles) et que la fréquence des pluies et l'humidité relative sont plus élevées.

4.1.1. L'ETAT ACTUEL DE LA POLLUTION A CHAMBORD

Les eaux de pluies tombant à Chambord ont été analysées par chromatographie ionique, et montrent des teneurs en sulfates faibles. Elles sont de l'ordre de 3,7 mg/L, et le pH est compris entre 6,5 et 6,8, ce qui situe les eaux de pluies recueillies à Chambord dans la moyenne des eaux des pluies habituelles (Fassina, 1987). Des concentrations comparables ont été mesurées aux châteaux de Versailles (10 mg/L) et de Chenonceau (1 mg/L), ce dernier étant en contexte rural comme Chambord (Kloppmann *et al.*, 2011).

Concernant la qualité de l'air, la surveillance du taux de pollution dans les villes est effectuée par des mesures de dioxyde de soufre, d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone, d'ozone et de quantité de particules inférieures à 10 μm . La commune de Chambord étant située en milieu rural, ces mesures n'ont jamais été réalisées sur ce site. En revanche, la ville de Blois, située à une quinzaine de kilomètres de Chambord, fait l'objet de surveillances et de statistiques annuelles depuis 2002¹²¹. Les teneurs en SO_2 mesurées sont constantes d'une année sur l'autre, et inférieures à 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les mesures ont donc été arrêtées en 2007, car les teneurs ont été jugées négligeables du point de vue polluant. En effet, elles sont bien inférieures aux seuils recommandés par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), qui situent la valeur limite à 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'objectif de qualité de l'air moyenne est fixé à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cette limite étant abaissée à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la protection des écosystèmes¹²². Certains auteurs évoquent un « niveau de sécurité » à ne pas dépasser, qui serait de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et sous lequel les sulfates ne contribuent pas à l'altération de la pierre (Sharma et Gupta, 1993). Kucera (2000) propose une tranche de

¹²¹ Lig'Air, surveillance de la qualité de l'air en Région Centre

¹²² Décret n°2002-213 du 15 février 2002 relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement, aux objectifs de qualité de l'air, aux seuils d'alerte et aux valeurs limites

valeurs de concentration de SO₂ dans l'air acceptables vis-à-vis des pierres calcaires, et situe le seuil de tolérance entre 7 et 12 µg/m³. Les mesures faites à Blois sont donc bien en-deçà des seuils proposés, et l'on peut donc penser que Chambord, situé en milieu rural à une quinzaine de kilomètres, présente des teneurs en SO₂ équivalentes si ce n'est inférieures. Mais l'existence de ces seuils n'est pas admise par tous, ce qui suggère que les problèmes d'altérations dus aux polluants atmosphériques ne sont pas uniquement fonction de la quantité présente dans l'atmosphère, mais peut-être également fonction de phénomènes d'accumulation de polluants au fil des années à la surface et dans la pierre.

4.1.2. CHRONOLOGIE ET PRESENCE DE GYPSE : INDICE D'UNE POLLUTION ANCIENNE ?

Les desquamations en feuillets prélevées à Chambord contiennent 5 à 10 % massique de gypse. C'est peu en comparaison de ces mêmes altérations prélevées cette fois au château de Blois, sur des tuffeaux vraisemblablement d'origine, posés à la même époque que ceux du château de Chambord, mais ayant évolué dans un contexte urbain, et qui en contiennent plus de 20 %. Pourtant, ces résultats élevés vont à l'encontre des teneurs actuelles mesurées dans l'air et dans les eaux de pluies.

D'autres études de cas montrent que les concentrations en gaz polluants mesurées n'ont rien d'alarmant et sont en-dessous des seuils imposés par les normes. On sait toutefois que la pollution atmosphérique des dernières décennies, voire celle du XIX^e siècle beaucoup plus importante que celle d'aujourd'hui, joue un rôle dans l'altération actuelle des monuments (Meurer et Vogt, 1999). L'atmosphère de Chambord a-t-elle pu contenir par le passé plus de soufre qu'elle n'en contient aujourd'hui ?

Les textes font remonter au XVI^e siècle l'utilisation du charbon, et donc la production de soufre atmosphérique, entraînant le mécontentement populaire vis à vis de la qualité de l'air, enfumé. Mais ce n'est qu'à partir de 1850-1880 que l'expansion de cette pollution atmosphérique a lieu et que l'on commence à s'intéresser à sa composition et ses effets. C'est essentiellement des gaz sulfureux dont il est question, à la fois provenant de la combustion domestique et de la combustion industrielle (Halliday, 1961). Brimblecombe et Grossi (2009) présentent des estimations de quantités de SO₂ dans l'atmosphère de Londres entre 1125 et aujourd'hui, et des prédictions jusqu'en 2090. C'est à partir de 1575 que les quantités augmentent de manière significative (on passe de 5 à 20 µg/m³), jusqu'à atteindre un maximum autour de 1890 (400 µg/m³), pour revenir en 1990 à des quantités comparables au

XVI^e siècle¹²³. En effet, on remarque depuis les années 1990 une réduction des émissions de soufres atmosphériques dans les grandes agglomérations, en raison de l'augmentation de la rigueur des normes sur la teneur en soufre des combustibles (Doehne et Price, 2010), même si le taux d'encrassement des monuments historiques reste élevé, en raison d'une augmentation substantielle des émissions de particules et des résidus issus de la combustion du gasoil par les moteurs diesel (Grossi *et al.*, 2003).

Mais si le gypse analysé aujourd'hui sur les pierres altérées ne provient pas d'une pollution actuelle, peut-être est-il dû à une pollution plus ancienne ? Sur l'aile Sud et la tour du Chaudron, on ne voit pas de desquamations en feuillets sur des pierres posées plus récemment que 1970 pour les tuffeaux (travées 11 et 12 avec prélèvement illustré à la Figure 85) et 1980 pour la pierre de Richemont (rares balustres des rambardes de la tour du Chaudron), les deux dates de pose ayant montré la présence de gypse dans les feuillets. Les pierres posées plus récemment sur les parements ne présentent pas de desquamations en feuillets ou en plaques, et la présence de sulfates en surface n'a pas été attestée par prélèvement de poudre par grattage et analyse en chromatographie ionique. Deux solutions sont possibles :

- Comme dans le cas des desquamations en plaques, les sulfates s'accumulent dans la pierre et non à la surface, les grattages de pierre en surface ne peuvent révéler leur présence
- Depuis la pose récente de ces pierres, il n'y a pas dans l'atmosphère de pollution en soufre suffisante pour permettre l'accumulation de gypse.

Si l'on s'intéresse à la deuxième hypothèse, il faut remonter à des pierres beaucoup plus anciennes afin d'évaluer la possible présence ou non de polluants plus anciens. Lors de restaurations réalisées entre 1882 et 1894, de nombreux ensembles sculptés de la lanterne et des cheminées ont été déposés pour être remplacés par de nouvelles pierres. Ces sculptures ont été conservées, puis remontées et entreposées dans le dépôt lapidaire du château à la fin du XIX^e siècle. Ces pierres n'ont donc pas été en contact direct avec l'atmosphère depuis cette date (Desbois, 1894). Or, les concentrations de gypse mesurées dans ces pierres, notamment au niveau de desquamations en feuillets, sont importantes, légèrement inférieures à celles mesurées sur les desquamations en feuillets encore en place en extérieur, mais tout de même significatives (> 2 % massique de gypse).

¹²³ Pour ces mêmes dates jusqu'à aujourd'hui, il semblerait que la température moyenne augmente de 2°C avec le temps, mais que la pluviométrie et l'humidité relative sont totalement stables

La présence de gypse dans ces proportions dans des pierres anciennes, et son absence au niveau de pierres récentes interpelle, et pourrait aller dans le sens du rôle possible d'une pollution ancienne s'étant accumulée dans la production du gypse actuel.

Cependant, ce n'est pas parce qu'il y a présence de gypse qu'il est forcément issu du soufre atmosphérique, d'autres provenances doivent être envisagées, d'autant plus que la situation de Chambord en milieu rural pourrait rendre discutable l'influence unique de la pollution industrielle, urbaine ou domestique.

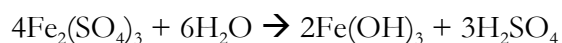
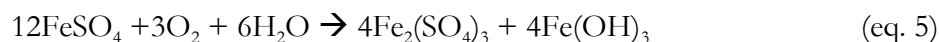
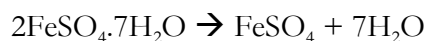
4.2. AUTRES PROVENANCES POSSIBLES DES SULFATES A L'ECHELLE DE LA PIERRE

4.2.1. DES SOURCES NATURELLES

4.2.1.1. LA PYRITE

La pyrite est un sulfure de fer gris métallique (FeS_2) qui se transforme en oxyde de fer et provoque un accroissement de volume pouvant entraîner l'éclatement de la pierre.

La pyrite, en présence d'oxygène et d'eau, forme de l'oxyde de fer, mais aussi de l'acide sulfurique (eq. 4), et la réaction peut se poursuivre pour augmenter cette production d'acide sulfurique à partir de l'oxyde de fer formé (eq. 5) (Bigas et Martinet, 2009 ; Vergès-Belmin, 2001).



D'après Bourcart, cité par Pochon (1968) certains tuffeaux contiendraient des traces de pyrite de l'ordre de 0,3 %. Certains grès en contiendraient également (Félix, 1985).

Cependant, ces minéraux sont localisés de façons extrêmement ponctuelles, et réparties de manière hétérogène dans la roche. Les tuffeaux sains analysés en chromatographie ionique,

que ce soient les parties saines des carottes prélevées ou des tuffeaux de carrière (Usseau, Villentrois, Saint-Cyr-en-Bourg), n'ont pas montré la présence de sulfates à des concentrations significatives (sulfates < 0,05 % massique, soit gypse < 0,08% massique). Les tuffeaux du Sud-Saumurois étudiés par Clément *et al.* (1990) n'en contiennent pas non plus.

Il semble que cette source de gypse reste anecdotique, et qu'elle ne puisse pas être à l'origine des teneurs en gypse observées sur les pierres altérées (Pauly, 1990) ; elle pourrait éventuellement y participer en très faible quantité si toutefois sa présence était avérée.

4.2.1.2. LES COLONISATIONS BIOLOGIQUES

L'éventualité du rôle des colonisations biologiques dans la production de sulfates a très souvent été évoquée, et principalement l'activité microbienne : les thiobacilles sont capables d'oxyder le soufre en sulfates. La présence de sulfates dans les zones de desquamation en plaques peut statistiquement être corrélée à l'ampleur de la population et à l'activité des thiobacilles à la surface et en profondeur de la pierre, parfois présents jusqu'à 10 cm (Brunet *et* Orial, 1992 ; Pochon, 1968).

Il convient de souligner que ces micro-organismes ne sont pas responsables de la production de soufre, ni directement de la formation de gypse, mais uniquement à l'origine de la transformation du soufre ambiant en H_2SO_4 . Ce soufre peut provenir du SO_2 gazeux contenu dans l'air pollué, ou encore de la pierre elle-même. Une fois la solution de H_2SO_4 produite par les micro-organismes, le mécanisme de formation du gypse à partir de la calcite de la pierre est le même que celui cité plus haut. Ces bactéries ont donc un rôle d'accélérateur, voire de catalyseur de cette réaction (Rautureau, 2001 ; Warscheid et Braams, 2000). Saiz-Jimenez (1997) montre qu'il y a une double action des bactéries, à la fois négative et positive, puisqu'elles participent à la formation de sulfates, mais également à leur élimination. En fait, il semblerait plutôt que ces bactéries permettent la répétition de ce cycle de production d'acide sulfurique à partir du gypse formé et remis en solution lors de l'imbibition de la pierre. Si ces phénomènes étaient avérés à Chambord, la diminution de la pollution et des sources soufrées dans l'atmosphère ces dernières années ne suffirait pas à éliminer totalement la production de gypse et son accumulation dans la pierre.

Cependant, tous les auteurs ne s'accordent pas sur le rôle prépondérant de ces bactéries, puisqu'il existe d'autres cas où la population de ces bactéries et leur production de sulfates n'ont pas été jugées suffisantes pour expliquer les quantités de gypse mesurées sur les

monuments (Caneva et Salvadori, 1987). La quantité de SO_2 qui serait nécessaire (minimum 50 ppm soit $143000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est également bien supérieure à celles mesurées en général dans l'atmosphère (Lazzarini et Tabasso, 1989). Mais on sait que ces concentrations dans l'atmosphère ont parfois été plus importantes au début du XX^e siècle, et de plus, l'effet cumulatif évoqué dans le paragraphe précédent pourrait avoir un rôle (voir § 4.1.2).

D'autres colonisations biologiques sont parfois citées comme étant à l'origine de la formation de gypse dans la pierre. Il s'agit de certains lichens, qui auraient la capacité de catalyser la réaction entre l'acide sulfurique et la calcite (Lallemant, 1992), y compris dans des environnements très peu pollués, et sur des substrats variés ne contenant parfois que peu de calcite, voire pas du tout comme les granites (Prieto *et al.* 1999). Sur la tour du Chaudron, l'analyse en chromatographie ionique des prélèvements de la surface de la pierre présentant des lichens n'avait pas montré de quantités significatives de gypse ($<0,5$ % massique). En revanche, d'autres formes de lichens (autres que les lichens gris) présents sur la tour ont été analysées. D'une morphologie différente, plus sombres et plus épais, ces lichens sont principalement localisés sur les reliefs horizontaux. Les observations au microscope électronique à balayage et les analyses de diffractions de rayons X et de chromatographie ionique ont confirmé la présence de gypse dans ces lichens, dans des quantités significatives, autour de 2 % massique. Cependant, cette forme de lichens n'est située que sur les reliefs horizontaux, la relation directe avec les desquamations en plaques ou en feuillets ne peut être faite. En revanche, on peut envisager que le gypse ainsi formé et accumulé peut être remobilisé lors d'épisodes de pluies et ruisseler sous les parties horizontales pour alimenter les desquamations en feuillets, ou pénétrer dans la pierre et migrer par remontées capillaires jusqu'aux desquamations en plaques situées au-dessus, généralement dans des zones peu éloignées de ces reliefs.

Mais cette source de formation de gypse ne peut pas être exclusive puisque ces lichens ne sont pas systématiquement présents sur le monument. De plus, l'activité microbienne n'a pas été caractérisée dans ce travail, et il est difficile de se prononcer sur le rôle des bactéries dans la transformation du soufre atmosphérique pour le château de Chambord. En revanche, il n'est pas à exclure que les colonisations biologiques en surface des pierres aient un rôle dans d'autres phénomènes que la production de gypse, comme la modification du comportement thermo-hydrique de la pierre, par l'augmentation de la durée d'humidification en surface par exemple (Warsheid et Braams, 2000).

4.2.2. DES SOURCES ANTHROPIQUES

Les mortiers de pose ou de rejointoiment peuvent contenir des sels, et éventuellement des sulfates, dont la dissolution au cours des épisodes de pluie peut favoriser la migration dans la pierre. Sur le tuffeau, l'emploi de plâtre dans des mortiers de ragréage, en mélange avec de la poudre de tuffeau et de la chaux, était une pratique courante qui tend à disparaître. Nombre de monuments sont concernés, à Azay-le-Rideau, Blois, Chenonceau, Amboise, etc (Rolland, 1999). Cependant, cet usage n'a jamais été repéré dans les textes étudiés relatifs à l'aile Sud et la tour du Chaudron, et les observations et les relevés de terrain ne l'ont pas non plus mis en évidence.

Des mortiers de rejointoiment et enduits de différentes natures ont été prélevés à différents endroits du château, afin d'en mesurer les teneurs en sulfates en chromatographie ionique :

- Des mortiers exposés à l'atmosphère :
 - mortier de rejointoiment au niveau de la zone prélevée par carottage – *a priori* XVI^e siècle
 - enduit au ciment sur la tour du chaudron – deuxième moitié du XX^e siècle
- Des mortiers abrités des conditions atmosphériques :
 - mortier de rejointoiment dans une des latrines du château - XVI^e siècle
 - deux sortes de mortiers de pose des murs de refend de l'aile Sud - XVI^e siècle (prélèvement S. Bryant, INRAP)

Dans tous les cas, que les mortiers soient exposés ou non à l'atmosphère, les teneurs en gypse ne sont pas significatives (< 0,5 % massique).

Les terrasses de l'aile Sud et de la tour du Chaudron sont actuellement en béton. L'influence de ce matériau a été évoquée au paragraphe 2.3.1 lorsqu'il s'agissait de prélever au niveau de zones altérées dans d'autres zones du château qui ne seraient pas situées en dessous de ces dalles en béton. Le gypse étant un des constituants du ciment formant le béton, il n'est pas impossible que le béton relargue des sulfates qui pourraient ensuite se retrouver dans la pierre. Les analyses montrent moins de sulfates dans les eaux de pluies recueillies directement (3,7 mg/L), que dans les eaux de pluies recueillies après ruissellement sur les dalles en béton (10,6 mg/L). Les sulfates issus du béton seraient donc une source potentielle à prendre en compte si la pluie qui tombe sur les dalles en béton ruisselait sur les parements de l'enceinte basse. Cependant, l'eau accumulée sur les terrasses est évacuée par des gouttières, et des

prélèvements effectués à d'autres endroits du château sur des pierres altérées éloignées des dalles en béton ont montré les mêmes proportions de gypse que les pierres altérées de la tour et de l'aile Sud. Cette source de sulfates ne paraît donc pas suffisante pour expliquer les teneurs en gypse mesurées dans les pierres.

Enfin, même s'ils ne contiennent pas eux-mêmes de sels nocifs, certains mortiers jouent un rôle indirect dans l'altération des pierres par les sels. Dans le cas de l'Abbaye de Fontevraud, les mortiers utilisés à différentes époques, à base de chaux aérienne, sont mieux adaptés au tuffeau que certains mortiers cimentaires utilisés au XX^e siècle. Les mortiers à base de chaux sont poreux et perméables et permettent une bonne circulation des fluides entre la pierre et les joints, alors que les mortiers cimentaires (en plus de leur effet strictement mécanique) limitent cette circulation, entraînant l'accumulation des solutions sulfatées à l'interface entre la pierre et le mortier. L'accumulation et la cristallisation des sels à cet endroit au moment du séchage conduirait alors à la fissuration de la roche et la chute d'une plaque (Jeannette *et al.*, 1985). C'est ce même phénomène qui a été évoqué dans la problématique de compatibilité Richemont/Tuffeau par Derbez (1999) (voir § 2.5), mais cette étude n'a pas permis de le mettre en évidence.

4.3. BILAN SUR L'ORIGINE DU GYPSE

L'ensemble des sources de gypse qui ont été envisagées dans cette étude a été répertorié dans le Tableau 7. En gris apparaissent les sources de gypse qui sont des sources indirectes, puisqu'elles n'en produisent pas et servent essentiellement de catalyseurs ou d'accélérateur de la réaction. Les valeurs mesurées sont comparées avec celles pouvant servir de référence dans la littérature ou selon le référentiel du château.

Si le gypse joue un quelconque rôle dans la desquamation en plaques, l'une des préconisations pour remédier à cette formation de sel serait d'en éliminer l'origine, autant que possible. Mais les provenances possibles du gypse que l'on retrouve dans la pierre sont multiples et les caractérisations réalisées pour tester des différentes sources n'ont pas abouti à l'identification claire d'une unique provenance, même si une tendance semble se dessiner en faveur de la pollution atmosphérique due à l'activité humaine.

Des travaux récents ont été menés concernant l'étude des provenances possibles du gypse sur un monument altéré (Kloppmann *et al.*, 2011 ; Craddock *et al.*, 2008 ; Vallet *et al.*,

2006). L'analyse des isotopes du soufre, de l'oxygène, du bore, et les rapports entre eux, permettent de discriminer les apports internes de soufre et les apports atmosphériques.

Selon Hammecker (1993), l'origine du gypse, au moins en milieu urbain, est incontestablement atmosphérique, puisque, c'est la seule source d'apport soufré qui soit suffisamment régulière et constante pour expliquer sa répartition homogène sur un bâtiment. De plus, dans la plupart des études isotopiques de provenance du gypse dans les monuments, l'origine est principalement atmosphérique (Siedel et Klemm, 2000 ; Sramek, 1980 ; Lazzarini et Tabasso, 1989). Dans le cas du château de Chambord, la pollution atmosphérique est suspectée, mais sa position en contexte rural conduit à s'interroger sur la réalité d'une telle hypothèse. Une analyse isotopique sur des prélèvements réalisés à Chambord pourrait donc affiner cette hypothèse.

Origine				Analyses		
				zones	Valeurs mesurées	Références
À l'échelle du château	Naturelle	Activité volcanique		-	-	-
		Activité océanique		-	-	-
	Anthro- pique	Pollution	Actuelle	Eau de pluie (quantité de sulfates)	3,7 mg/L	1 mg/L (Chenonceau)
				Qualité de l'air (teneur en SO ₂)	1 µg/m ³ (Blois)	Seuils dans la littérature : 7 ou 30 µg/m ³
		Ancienne	Pierres posées après 1980	Pas de feuillets pas de gypse	> 5 % massique de gypse pour la plupart des feuillets du château	
			Pierres anciennes déposées entre 1882 et 1894	> 2 % massique de gypse		
À l'échelle de la pierre	Naturelle	Pyrite dans la pierre		Pierre saine	< 0,05 % massique de sulfates (= 0,08% de gypse)	Parfois 0,3 % de pyrite
		Biolo- gique	Bactéries	-	-	-
			Lichens	Une des natures de lichens	2 % massique de gypse sur une surface recouverte de lichens	< 0,05 % massique de gypse sur une surface sans lichens
	Anthro- pique	Plâtre		-	-	-
		Mortiers de joints		Variés	< 0,5 % massique de gypse	-
		Béton/ciment		Dalles de la terrasse	7 mg/L de sulfates relargués par la dalle	-

TABEAU 7 : RECAPITULATIF DES DIFFERENTES PROVENANCES POSSIBLES DU GYPSE ET EVALUATION DE LEUR PROBABILITE

5. CONCLUSION

Le diagnostic de l'état d'altération du château de Chambord a clairement montré que les desquamations en plaques et en feuillets sont les altérations les plus dommageables pour la pierre.

Les analyses des hypothèses relatives aux facteurs et aux mécanismes d'altération proposés dans la littérature ne permettent pas d'établir de consensus sur un scénario expliquant toutes les étapes d'une desquamation. L'une des explications de ce verrou scientifique est que les hypothèses proposées n'ont jamais été clairement démontrées, soit par un fondement théorique, soit par une preuve expérimentale. Néanmoins, cette étude de l'état de l'art a permis de recenser les facteurs les plus probables associés à ces altérations, ainsi que les mécanismes les plus vraisemblables permettant de représenter le processus d'altération de la desquamation :

- La dissolution de la calcite de la pierre et sa recristallisation entraîneraient une imperméabilisation de la surface de la pierre et une modification de la circulation des solutions à l'intérieur de la porosité, à l'origine d'une fragilisation du matériau.
- Les cycles thermiques et hydriques journaliers et saisonniers provoqueraient des dilatations différentielles entre le cœur de la pierre et la surface exposée, et pourraient être à l'origine des microfissurations progressives dans la pierre d'autant plus dans le cas de la présence de minéraux argileux gonflants.
- Le gypse pourrait cristalliser et s'accumuler dans la zone de marnage des mouvements hydriques, générant une hétérogénéité locale des propriétés physiques et mécaniques de la pierre et une pression de cristallisation, entraînant la fissuration progressive de la pierre.

Les analyses pratiquées sur tous les échantillons prélevés ont montré la présence significative de gypse avec un maximum systématiquement situé au niveau de la fissure proche de la surface exposée de la pierre. Ce gypse peut avoir de multiples provenances. La validité des différentes hypothèses issues de la littérature a été discutée au regard du contexte environnemental de Chambord. Aussi, l'étude des desquamations en feuillets permet de discriminer les processus de formation de cette altération en comparaison/opposition avec ceux des desquamations en plaques.

Le bilan des données de la littérature et des caractérisations effectuées a permis d'estimer la probabilité associée à l'importance du rôle du gypse dans l'altération par desquamations en plaques ou en feuillets en fonction du contexte environnemental de Chambord et de la nature de la pierre. Les fondements d'un nouveau mécanisme expliquant les desquamations sont présentés. Il semblerait que dans le cas du château de Chambord, la provenance du gypse soit principalement la pollution atmosphérique. En revanche, les processus de formation du gypse n'ont pas pu être établis. Le chapitre suivant a pour objectif d'apporter des éléments pour critiquer ces nouvelles hypothèses et de proposer des mécanismes crédibles de formation du gypse dans la pierre.

CHAPITRE 6

LE GYPSE DANS LE PHÉNOMÈNE DE DESQUAMATION – SIMULATION EXPÉRIMENTALE

Comme l'a montré le chapitre précédent, même si la présence de gypse au niveau de la fissure d'une desquamation en plaques a souvent été attestée et a fait l'objet de nombreuses hypothèses, son lien direct avec la fissure n'a jamais été démontré. De même, le gypse n'étant pas systématiquement présent dans le cas de certaines desquamations en plaques, son rôle a été totalement remis en question ces dernières années, de même que les mécanismes qui avaient été considérés comme acquis. Toutefois, dans le cas du château de Chambord, la présence systématique de gypse au niveau de la zone fracturée intrigue, et c'est avec l'aide de la simulation expérimentale que nous allons essayer de répondre à cette question : **quel est le rôle du gypse ?**

Deux questions corollaires peuvent également être posées :

- **Quelle est la provenance du gypse ?** À l'issue du chapitre précédent, il n'a pas été possible de discriminer avec certitude la provenance du gypse, même s'il y a de fortes présomptions en faveur du soufre atmosphérique. Ce chapitre a pour objectif de tenter d'apporter des éléments supplémentaires afin de confirmer la provenance la plus probable, et surtout d'en apporter la démonstration.
- **Quel est le mécanisme de pénétration du gypse au cœur de la pierre ?** Ce chapitre va permettre d'évaluer la manière la plus probable dont le gypse peut se former et est véhiculé dans la pierre en fonction de sa provenance.

Dans un premier temps, ce chapitre va s'attacher à décrire les propriétés connues du gypse et notamment sa relation avec un substrat poreux. En parallèle seront présentés divers tests préliminaires réalisés sur du tuffeau afin de vérifier que ces propriétés sont applicables au

matériau étudié. Dans un deuxième temps, les différents protocoles de simulation expérimentale réalisés pour répondre aux questions posées seront décrits, et ensuite les résultats seront exposés puis analysés. Enfin, à partir d'une synthèse globale de ce travail de thèse, divers scénarii possibles seront présentés afin de décrire les mécanismes mis en jeu dans le phénomène de desquamation en plaques du tuffeau au château de Chambord.

1. PROPRIETES DU GYPSE EN RELATION AVEC LA PIERRE

La littérature est riche en ce qui concerne la description des mécanismes de formation du gypse de manière générale, que ce soit dans le cadre d'applications industrielles ou dans le cadre de problématiques de conservation du patrimoine.

Dans un premier temps, les diverses réactions chimiques à l'origine de la formation du gypse seront présentées, ainsi que leurs interactions avec la pierre. Ensuite, les phénomènes en jeu durant la solubilisation / cristallisation de ce sel lors des épisodes d'humidification / séchage de la pierre seront décrits d'après les données de la littérature. Notre connaissance de l'implication du gypse dans la dégradation des pierres des monuments est principalement liée aux dépôts de surface, et notamment les croûtes noires. Une synthèse bibliographique sur les vieillissements artificiels sera menée pour décrire les formes de dépôts associés et leurs cinétiques.

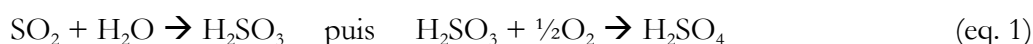
Des tests préliminaires effectués dans des conditions extrêmes de quantité de sel polluant serviront à vérifier la concordance entre les principes généraux de formation et de pénétration du gypse et le cas particulier du matériau considéré. Une critique de ces tests préliminaires permettra de mettre au point la campagne expérimentale principale de vieillissements artificiels.

1.1. LES MECANISMES DE FORMATION DU GYPSE ET LA RELATION PIERRE/ATMOSPHERE

1.1.1. LES REACTIONS CHIMIQUES DE FORMATION DU GYPSE

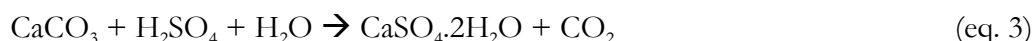
Dans le cas de la provenance atmosphérique du soufre, plusieurs réactions se produisent (Lazzarini et Tabasso, 1989) :

Le dioxyde de soufre présent à l'état gazeux dans l'atmosphère peut réagir avec l'eau, présente sous forme de vapeur ou de microgouttelettes, pour former de l'acide sulfurique H_2SO_4 selon deux voies réactionnelles possibles (eq. 1 et eq. 2), la première étant la plus probable :



Les oxydes d'azote (NO et NO_2), l'ozone (O_3) et divers oxydes métalliques (notamment les oxydes de fer) sont connus pour être des catalyseurs de ces réactions (Bai *et al.*, 2006 ; Böke *et al.*, 1999). La dissolution du SO_2 gazeux dans l'eau est rapide, mais le pH de la solution joue sur la cinétique, car en-dessous de $\text{pH}=2$, le SO_2 ne peut plus se dissoudre. L'oxydation du SO_2 en H_2SO_4 , en revanche, est plus lente (Bard, 2011 ; Fassina, 1987).

L'acide sulfurique en solution peut ensuite réagir avec la calcite, généralement celle de la pierre ou celle des mortiers, pour former du gypse (eq. 3) :



Cette dernière réaction ne nécessite pas de catalyseur particulier et est extrêmement rapide en comparaison de la transformation du dioxyde de soufre en acide sulfurique. Le processus de formation du gypse par cette réaction se fait en deux étapes : la dissolution de la calcite par l'eau acide, puis la formation des cristaux de gypse. Dans le cas d'étude expérimentale sur la réaction entre des grains de calcite et des solutions d' H_2SO_4 ¹²⁴, il semblerait que ce soit la surface extérieure des grains de calcite qui soit dissoute, le gypse se formant alors à la surface de ces grains (Bart, 2011).

Dans le cas d'échantillons naturels comme ceux prélevés sur la tour du Chaudron, l'observation des cristaux de gypse laisse à penser que c'est à partir de la calcite micritique que

¹²⁴ Concentrations variées d' H_2SO_4 allant de 0,15 à 0,60 mol/kg

se forme le gypse, comme le suggère cette agglomération de cristaux de gypse et de micrite présentée à la Figure 88. D'autres études sur des tests de vieillissement montrent également que le gypse était uniquement formé à partir de la calcite micritique, et engendre des cristaux de taille équivalente, alors qu'aucune réaction ne semble avoir eu lieu avec la calcite sparitique (Gomes-Heras *et al.*, 2008 ; Derbez, 1999). Les cristaux de calcite micritique (10 μm en moyenne), sont près de dix fois plus petits que ceux de la calcite sparitique, et il a été démontré que le gypse se forme beaucoup plus rapidement avec des cristaux de petite taille présentant une surface réactionnelle plus grande (Bard, 2011).

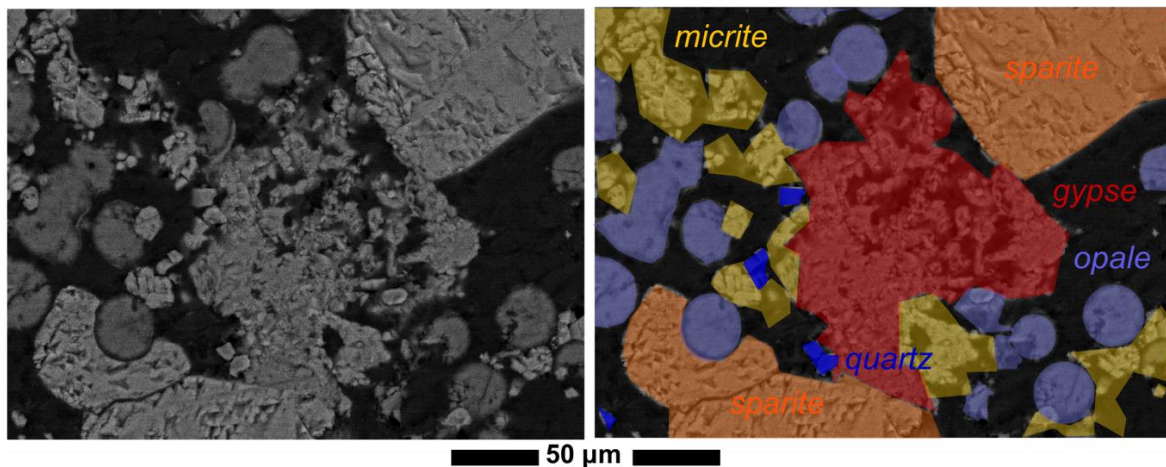


FIGURE 88 : OBSERVATION AU MEB DE CRISTAUX DE GYPSE LOCALISES DANS LA FISSURE DE L'ECHANTILLON B2

1.1.2. LES FORMES DE DÉPÔT

Lorsqu'une pierre contient du gypse en surface ou en profondeur, la provenance du soufre est bien souvent atmosphérique. Mais les équations 1 (ou 2) et 3, et donc la production de gypse, peuvent s'effectuer de différentes manières vis à vis de la pierre, sous forme de différentes natures de dépôts (Fassina, 1987) :

- Le gypse peut se former dans l'atmosphère si tous les éléments sont présents et être déposé par les eaux de pluies à la surface de la pierre comme les autres particules en suspension (dépôt par voie humide). En effet, il a été observé que les cendres volantes dans l'atmosphère contenaient tous les composés nécessaires à la formation de gypse en présence d'humidité, indépendamment d'un substrat

calcaire. Ces réactions peuvent donc se faire dans l'atmosphère sous forme d'aérosols (Del Monte *et al.*, 1984a).

- Le gypse peut se former directement à la surface de la pierre, une fois que la formation d'acide sulfurique a eu lieu dans l'atmosphère : les gouttelettes se déposent sur la pierre, et l'acide réagit avec la calcite de la pierre pour former du gypse (dépôt par voie humide). La réaction de formation du H_2SO_4 à partir du SO_2 gazeux peut aussi se former à la surface de la pierre lorsque celle-ci est humide. La dissolution de la calcite se produit ensuite dans la continuité, toujours à la surface de la pierre (Lazzarini et Tabasso, 1989).
- L'ensemble de ces réactions peut avoir lieu au cœur de la pierre, le SO_2 pénétrant sous forme gazeuse (dépôt par voie sèche), et la réaction se faisant dans la pierre après un apport d'humidité. Le dépôt du SO_2 sur une pierre poreuse a été évalué à $0,8 \text{ cm.s}^{-1}$ (Fassina, 1987), mais des études expérimentales ont montré que sur des pierres calcaires à porosité importante, cette vitesse de dépôt est plus proche de $0,2 \text{ cm.s}^{-1}$ (Cobourn *et al.*, 1993 ; Furlan et Girardet, 1992).

Les dépôts par voie humide sont favorisés par la présence d'humidité sur les parements, notamment là où la pierre est la plus froide et où la condensation provoque un film d'eau à la surface de la pierre, même sans épisode de pluie. Selon la porosité de la pierre, ces dépôts pénètrent plus ou moins profondément dans la pierre. S'ils restent en surface, ces dépôts peuvent être éliminés peu à peu par le lessivage des eaux de pluie.

À l'inverse, dans le cas des dépôts par voie sèche, l'humidité de surface de la pierre limite fortement la pénétration du SO_2 gazeux dans la pierre, puisque les réactions se font à la surface. Ce dernier mécanisme se révélerait donc généralement secondaire dans l'apport de polluant et la production de gypse en contact avec la pierre. Le flux de SO_2 gazeux et sa réactivité avec différentes natures de pierre ont été étudiés, et montrent que les dépôts secs dépendent de la réactivité de la pierre, du niveau du polluant et du temps d'exposition de la pierre à ce polluant. Dans le cas de matériaux poreux, la quantité de soufre contenu dans la pierre est directement corrélée avec la concentration en SO_2 de l'atmosphère. Mais dans la majorité des cas étudiés, le gypse total formé et contenu dans la pierre provient à la fois des dépôts secs de SO_2 et des dépôts humides d'aérosols acides ou de particules (Connor et Girardet, 1992 ; Furlan et Girardet, 1992).

Concernant la cinétique de dépôt, il est souvent observé que les réactions, rapides au début, ralentissent ensuite quand l'échantillon commence à se recouvrir d'une couche de gypse qui limite la dissolution de la calcite et donc freine la production de gypse (Bard, 2011 ; Bouchelaghem, 2010).

1.1.3. VERIFICATIONS EXPERIMENTALES DES FORMES DE DEPOT

Il convenait tout d'abord de vérifier la concordance entre les principes énoncés plus haut et leur application dans le cas particulier du matériau étudié : le tuffeau, qui est une pierre silico-calcaire. Les réactions ont-elles bien lieu telles que les équations les décrivent, sans faire intervenir de catalyseurs particuliers ? Plusieurs tests préliminaires ont été effectués afin de vérifier expérimentalement ces mécanismes de dépôt, par voie humide et par voie sèche. La description des protocoles préliminaires réalisés est résumée dans le Tableau 8. Le tuffeau sain utilisé dans cette étude est un tuffeau extrait de la carrière Maquignon et Frère d'Usseau, située dans le département de la Vienne. Ses caractéristiques physiques se situent dans la moyenne de la famille des tuffeaux (voir Tableau 6 du Chapitre 5).

1.1.3.1. FORMATION DE GYPSE A PARTIR DES EAUX DE PLUIE ACIDES (VOIE HUMIDE)

Dans un premier temps, il convient de s'assurer que l'équation 3 (eq. 3), la plus simple et la plus courante des processus de formation du gypse, est bien applicable. Le premier essai a été mené en faisant réagir du H_2SO_4 à $\text{pH}=2$ d'une part avec de la calcite pure, puis, d'autre part, directement avec de la poudre de tuffeau, jusqu'à neutralisation complète de l'acide. Le résultat est concluant, puisque du gypse s'est formé.

La confirmation de ce processus a été faite également sur un échantillon massif, par imbibition capillaire de cette même solution d' H_2SO_4 $\text{pH}=2$ et par séchage à l'étuve à 40°C de l'échantillon non isolé (Tableau 8). Au cours des cinq cycles effectués, on observe que le temps d'imbibition augmente considérablement, passant de quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes pour imbiber la pierre sur 10 mm. Après les cinq cycles d'imbibition/séchage, la masse des échantillons a augmenté significativement. Les échantillons ont été analysés selon un profil de profondeur par diffraction des rayons X, et les diffractogrammes obtenus n'ont pas permis de détecter du gypse au-delà du premier millimètre de la surface.

1.1.3.2. FORMATION DE GYPSE A PARTIR DU DIOXYDE DE SOUFRE ATMOSPHERIQUE (VOIE SECHE)

Afin de vérifier l'application des équations eq. 1 et eq. 2, un autre test a été réalisé à partir de SO_2 gazeux en contact avec des échantillons de tuffeau.

Le Tableau 8 reprend les étapes du protocole d'injection du SO_2 dans les échantillons de tuffeau. Afin de permettre une saturation en SO_2 de tout le milieu poreux de la pierre, des échantillons de tuffeau sont placés dans une enceinte équipée d'un vacuomètre. Le vide est ensuite fait dans les échantillons jusqu'à une pression absolue de 10 mbar pendant 12 heures (1) avant injection du SO_2 jusqu'à retour à la pression atmosphérique (2). Après sept heures de contact des échantillons avec une atmosphère de SO_2 à 20°C, l'enceinte contenant les échantillons saturés en SO_2 est ouverte pour permettre l'imbibition capillaire des échantillons avec de l'eau distillée (3). L'intervalle de temps entre l'ouverture de l'enceinte et l'imbibition capillaire est très court, inférieur à 1 minute, afin d'éviter que le SO_2 gazeux ne sorte de l'échantillon, étant donné la forte perméabilité du tuffeau.

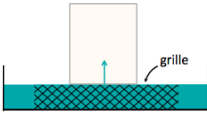
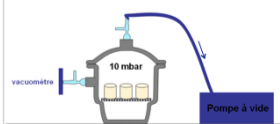
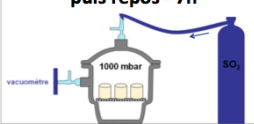
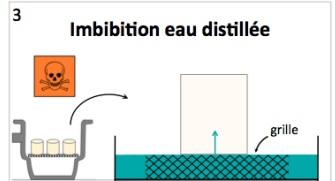
Mécanisme vérifié	Source	Protocole d'imbibition	Séchage	Nbre de cycles	Bilan
Formation de gypse à partir des eaux de pluie acides	H_2SO_4 à pH=2 en solution	Imbibition solution H_2SO_4 pH = 2 	Etuve à 40°C	5	Gypse en surface
Formation de gypse à partir du dioxyde de soufre atmosphérique	SO_2 gazeux	1 Mise sous vide - 12 h  2 Injection du gaz puis repos - 7h  3 Imbibition eau distillée 	Etuve à 40°C	2	Gypse en surface

TABLEAU 8 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TESTS PRELIMINAIRES REALISES POUR VERIFIER LES MECANISMES DE FORMATION DE GYPSE

Après séchage dans une étuve à 40°C, les échantillons ont été analysés après un cycle, et d'autres après deux cycles. À la sortie de l'étuve, on observe un léger jaunissement de l'échantillon, dans la zone qui a été imbibée. Dans tous les cas, ce jaunissement n'est observable qu'en surface, et n'affecte pas le cœur de l'échantillon. Les résultats obtenus en diffraction de rayons X montrent que le gypse ne se forme qu'en surface des échantillons,

dans une zone en contact avec l'air. Dans ce cas, la présence de gypse est directement corrélée à la couleur jaune observée, et donc à la localisation des zones d'évaporation.

1.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU GYPSE

Une fois le gypse formé, ses propriétés vont conditionner son comportement en surface et au sein de la pierre. Les données bibliographiques et les tests réalisés vont permettre de mieux approcher les processus de dissolution et de cristallisation du gypse, en relation avec le tuffeau.

Le sulfate de calcium existe sous trois formes :

- Le **gypse**, ou sulfate de calcium dihydraté : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- La **bassanite**, ou sulfate de calcium hémihydrate : $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
- L'**anhydrite** ou sulfate de calcium anhydre : CaSO_4

La transformation du gypse en bassanite, composé métastable, commence à partir de 42°C. Mais il faut des températures supérieures à 100°C pour que la réaction soit complète, la vitesse de la réaction dépendant de la température, et de l'état de cristallinité du gypse. Si celui-ci est mal cristallisé, il se déshydratera plus vite (Charola *et al.*, 2007). Dans ce travail de thèse, les échantillons prélevés in-situ ou issus de vieillissements artificiels ont, selon les besoins, été séchés dans une étuve à 40°C. Pour s'assurer que la température de cette étude n'influe pas sur la forme du sulfate de calcium compris dans la pierre, des tests de diffraction de rayons X ont été réalisés, de poudre de gypse et de gypse naturellement présents dans la pierre, chauffés à différentes températures. Les diffractogrammes ont montré que ce n'est qu'à partir de 70°C qu'apparaissent les pics caractéristiques de la bassanite conjointement à ceux du gypse (voir annexe 5).

Des trois formes de sulfates, c'est le gypse le plus abondant dans la nature, et c'est le seul en présence dans le cas de la dégradation des pierres en œuvre. Ce sont donc uniquement la solubilité, la cristallisation et la mobilité du gypse qui seront décrites dans ce chapitre. Ces propriétés seront vérifiées par des tests préliminaires dont les protocoles sont résumés dans le Tableau 9.

1.2.1. SOLUBILITÉ

Comme beaucoup d'autres sels, la solubilité du gypse augmente avec la température. Il a une solubilité de 2 g/L à 25°C, mais le maximum de solubilité est atteint autour de 42°C (2,1 g/L). À une température supérieure, cette solubilité décroît (Charola *et al.*, 2007).

Dans le cadre de ce travail de thèse, des tests d'imbibition capillaire ont donc été réalisés sur des échantillons de tuffeau, avec des solutions saturées en gypse, l'une à la température du laboratoire 20°C, l'autre chauffée à 40°C. Ces tests montrent que dans les deux cas, après séchage, du gypse s'est déposé à la surface de l'échantillon qui est soumise à l'imbibition. Les mesures quantitatives effectuées n'ont cependant pas permis de mettre en évidence la présence de gypse en plus grande quantité dans le cas de la solution chauffée à 40°C. De plus, la présence de gypse n'a pas pu être mise en évidence au cœur de la pierre, ni sur les parois extérieures participant au séchage autre que la surface d'imbibition, et ce pour aucun des deux tests.

Ces tests, réalisés en comparaison d'imbibitions capillaires à partir de solutions d'eau pure dans les mêmes conditions de température, ont également permis de mettre en évidence que pour un nombre faible de cycles (cinq cycles), la cinétique d'imbibition n'était pas modifiée. En effet, qu'il y ait présence de gypse ou non dans la solution, le temps d'imbibition est comparable. La cinétique de séchage à l'étuve à 40°C est également la même pour tous les cas de figure. On peut donc imaginer que la présence de gypse dans la solution n'a pas d'influence visible sur l'hygroscopicité de la pierre, ni sur les mouvements des solutions dans le milieu poreux. En effet, le gypse en solution, à l'inverse d'autres sels, n'a aucune influence sur la cinétique d'évaporation (Hammecker, 1993). En revanche, l'accumulation de gypse en surface de la pierre, là où il cristallise, joue un rôle dans la cinétique d'évaporation, qui diminue avec le nombre de cycles et l'accumulation de gypse en surface (Charola *et al.*, 2007). La réalisation de cycles avec de l'eau pure conduit également à une diminution de la cinétique d'évaporation à long terme, en raison de la formation d'une patine de calcite en surface de la pierre imbibée (Beck, 2006 ; Pauly, 1990).

1.2.2. CRISTALLISATION

En raison de sa faible solubilité, le gypse précipite très rapidement lorsque l'humidité relative ou la température baissent et que la solution est sursaturée. C'est *a priori* dans la zone

d'équilibre hydrique formée à la profondeur de déconnexion hydraulique, où le front d'évaporation depuis la surface et le flux d'eau d'imbibition s'équilibrent, qu'a lieu la cristallisation du gypse dans la porosité interstitielle, entraînant l'éclatement de la pierre (Charola et Herrodotus, 2000 ; Wendler *et al.*, 1990). Plus le degré de sursaturation de la solution sera élevé, plus les pressions de cristallisation seront importantes (Dessandier, 1995 ; Hammecker, 1993). Cependant, rien ne permet de prouver que ce phénomène a lieu dans la pierre dès le premier cycle.

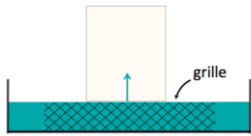
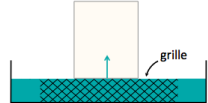
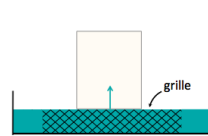
1.2.3. MOBILITÉ

Une fois qu'un polluant comme le gypse s'est formé, déposé à la surface de la pierre, la question de sa remobilisation se pose. En effet, il est admis que c'est généralement la répétition de cycles d'imbibition/séchage qui est à l'origine des phénomènes d'altération décrits. L'eau étant le principal véhicule des sels solubles, on peut imaginer que cette remobilisation des polluants déposés en surface peut *a priori* se faire par des eaux polluées, mais aussi par des eaux non polluées. Sur un monument, plus les pierres sont exposées aux pluies, plus le gypse est localisé en profondeur ; et plus elles sont à l'abri des pluies et des ruissellements, plus il est concentré à la surface (Félix, 1985). Les caractérisations effectuées au chapitre précédent ont bien vérifié cette affirmation dans le cas du château de Chambord.

Ce phénomène peut être reproduit expérimentalement par un apport de gypse en surface lors d'une imbibition capillaire de solution de gypse à saturation à 40°C ou d'une solution d' H_2SO_4 à pH=2 (comme évoqués précédemment). Ce premier cycle est suivi d'imbibitions/séchages successifs avec de l'eau non polluée, afin de produire un phénomène de « marée » et d'observer la remobilisation du polluant (Tableau 9).

Un autre test a consisté en un dépôt de gypse sous forme de poudre sur la surface supérieure d'un échantillon, suivi d'une imbibition capillaire descendante par dépôt de gouttes à la surface de l'échantillon jusqu'à ce que le front d'imbibition dépasse un centimètre. Dans tous les cas, le gypse est resté en surface, au niveau de la surface de la pierre en contact avec le polluant, et aucune présence de gypse n'a été détectée en profondeur de la pierre, ce qui incite à penser que la remobilisation du gypse cristallisé en surface est un phénomène long et limité à une petite échelle, à l'inverse d'autres sels plus solubles (Arnold et Zehnder, 1989).

De plus, il a été rapporté que le gypse, une fois déposé dans l'espace poreux, tend à s'accumuler localement au cours du temps (Charola *et al.*, 2007). En effet, la cristallisation des sels peut aussi être mise en relation avec la porosité, et notamment la taille et la forme des pores. C'est elle qui conditionne notamment la profondeur de cristallisation des sulfates (Auger, 1991). De plus, le gypse a tendance à s'accumuler dans les grands pores, ou le long des fissures (Charola *et al.*, 2007).

Mécanisme vérifié	Polluant	Protocole d'imbibition		Séchage	N ^{bre} de cycles	Bilan	
Solubilité du gypse	Gypse en solution à saturation	Imbibition solution eau + gypse 		Solution à 20°C	Etuve à 40°C	5	Gypse en surface
				Solution à 40°C	Etuve à 40°C	5	Gypse en surface
Mobilité du gypse ou « marée »	Dépôt de gypse en poudre + eau	Imbibitions eau 			Etuve à 40°C	5	Gypse en surface
	Gypse formé en surface par H ₂ SO ₄ ou gypse en solution + eau	1 cycle Imbibition solution H₂SO₄ pH =2 Ou Imbibition solution eau+gypse  + 4 cycles Imbibitions eau 			Etuve à 40°C	5	Gypse en surface

TABEAU 9 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TESTS PRELIMINAIRES REALISES POUR VERIFIER LES PROPRIETES DU GYPSE

L'ensemble des tests préliminaires présentés ici a été réalisé dans le but de vérifier les mécanismes de formation du gypse ainsi que ses propriétés. Seuls quelques cycles ont été réalisés, et le gypse, s'il se forme aisément en surface de la pierre, ne semble en revanche pas y pénétré au-delà du premier millimètre. Certains de ces protocoles vont être réutilisés dans la troisième partie de ce chapitre, pour des tests plus systématiques visant à comprendre les mécanismes de pénétration du gypse dans la pierre.

1.3. LES FORMES ET LES CINÉTIQUES DE DÉPÔTS DANS LES TESTS DE SULFATATION – ÉTAT DE L'ART

Avant de mettre en place des protocoles définitifs de simulation expérimentale en laboratoire, il était nécessaire de se pencher sur les tests de sulfatation déjà réalisés et décrits dans la littérature.

L'étude du soufre et de la pollution urbaine est généralement faite dans le cadre de diagnostics d'altération de pierres présentant des croûtes noires, telles que décrites dans le chapitre précédent, dans le but d'améliorer la compréhension des mécanismes de développement de ces croûtes noires (Török *et al.*, 2011 ; Sanjurjo-Sanchez, 2011 ; Fronteau *et al.*, 2010 ; Bai *et al.*, 2003 ; Smith *et al.*, 2003 ; Riontino *et al.*, 1998 ; Del Monte *et al.*, 1984b). D'autres publications s'intéressent aux vieillissements artificiels reproduisant ces dépôts sulfatés. Certains s'attachent à des aspects visuels comme les modifications chromatiques (Gomez-Heras *et al.*, 2008 ; Grossi *et al.*, 2000), d'autres étudient le suivi des dépôts de gypse ou de polluants en surface, étudiant la vitesse de déposition et d'adsorption des sulfates et la cinétique de formation du gypse, comme la plupart des publications décrites dans le Tableau 10.

Dans la plupart des cas présentés dans ce tableau, les vieillissements artificiels ont été réalisés en exposant des échantillons de pierres à des doses réalistes ou non de SO₂, de manière continue en chambre climatique, notamment la chambre de simulation atmosphérique de Lausanne (LASC). Des catalyseurs (particules, oxydes d'azote) sont parfois ajoutés au mélange. Très peu de vieillissements sont réalisés à partir de cycles d'imbibition/séchage, quelques-uns avec du gypse, mais aucun ne l'est avec des solutions d'acide sulfurique directement.

Que ce soient les vieillissements artificiels reproduits en laboratoire présentés dans la littérature, ou bien les tests préliminaires effectués dans cette étude, tous montrent le même phénomène : peu importe la source de polluant sélectionnée, le mode de contamination de l'échantillon, ou les doses choisies, du gypse se forme ou se dépose seulement en surface de la pierre, sur une épaisseur inférieure à 2 mm.

Aucune donnée connue ne semble pouvoir réellement démontrer ou mettre en évidence les mécanismes à l'origine de la présence de gypse à environ 1 cm de profondeur de la pierre, et de sa localisation préférentielle au niveau de la fissure. D'autres paramètres entrent

probablement en jeu, et la suite de ce chapitre va tenter d'en discriminer certains afin de proposer des hypothèses de mécanismes de pénétration du gypse.

Auteur	Polluants et conditions d'analyse	Matériaux	Objectif	Profondeur de dépôt
Pauly, 1990	- Cycles d'imbibition/séchage de gypse en solution saturée	Tuffeau Grès Molasses	Localisation de la cristallisation du gypse en fonction du traitement de surface	Sur pierre sans traitement : < 2 mm
Furlan et Girardet, 1988 Furlan et Girardet, 1992	- Pierres exposées en environnement urbain	Calcaires et Grès	Vitesses de dépôts et réactivité des pierres	En surface Profondeur non précisée
Connor et Girardet, 1992	- Pierres exposées en environnement urbain - Prélèvements <i>in situ</i> sur des pierres de monuments d'âge de pose connu	Molasses	Mode de fixation du soufre	Entre 1 et 1,4 mm
Haneef <i>et al.</i> , 1993a	- Divers protocoles avec SO ₂ , NO ₂ et/ou O ₃	Granite	Observation des dépôts	En surface Profondeur non précisée
Ausset, 1996	- SO ₂ , NO ₂ et particules carbonées - Exposition continue aux polluants	Calcaire et Grès	Observation de l'impact des particules	< 1 mm
Girardet et Furlan, 1996	- Pierres exposées en environnement urbain - SO ₂ et NO ₂ en exposition continue à différentes HR	Calcaire et Grès	Vitesses de dépôts	En surface Profondeur non précisée
Girardet <i>et al.</i> , 1996	- SO ₂ , NO ₂ et particules carbonées - Exposition continue aux polluants	Calcaire et molasse	Mode de fixation du soufre	< 1,5 mm
Prick, 1996	- Imbibition/séchage de gypse en solution saturée	Granites et calcaires (dont tuffeau)	Dilatation de la pierre sous l'action de sels	En surface Profondeur non précisée
Grossi et Murray, 1999	- Pierres exposées en environnement urbain - SO ₂ en exposition continue	Calcaires	Observation des dépôts	< 2 mm
Derbez, 1999	- SO ₂ en exposition continue	Tuffeau	Sulfatation du tuffeau	< 0,6 mm
Lefèvre, 2004	- Pierres exposées dans différents environnements urbains	Calcaires	Observation des dépôts	< 0,5 mm
Bai <i>et al.</i> , 2006	- Divers protocoles avec SO ₂ et/ou NO ₂ - En dépôt sec ou humide	Grès	Améliorations de la cinétique	En surface Profondeur non précisée
Gomes-Heras <i>et al.</i> , 2008	- Cycles de SO ₃ + imbibition/séchage - Ajout de particules	Calcaires	Observation de la formation de croûtes de gypse	En surface Profondeur non précisée

TABLEAU 10 : EXEMPLES DE TESTS DE SULFATATION REALISES DANS LE CADRE DE DEPOTS DE GYPSE EN ENVIRONNEMENT URBAIN

2. TESTS EN LABORATOIRE

Dans le paragraphe précédent, le fonctionnement des principaux mécanismes à l'origine de la formation du gypse à partir du SO_2 et du H_2SO_4 à la surface de la pierre a été vérifié sur le tuffeau. Cependant, si ces réactions ont bien lieu à la surface de la pierre, qu'en est-il du cœur de la pierre, zone où du gypse a été retrouvé dans les échantillons desquamés prélevés sur le château de Chambord ?

L'objectif de cette partie du chapitre est de trouver une explication et de proposer un mécanisme permettant de faire pénétrer du gypse à l'intérieur de la pierre. Aucun test de vieillissement artificiel ne semble avoir mis en évidence ce phénomène.

Plutôt que des simulations expérimentales de la desquamation en plaques, les protocoles présentés ici sont des tests pour comprendre la relation entre le gypse, la pierre et la fissure, en jouant sur différents paramètres : le mode de contamination de la pierre, la présence d'une fissure préexistante et son sens, et le protocole de séchage. Ces tests vont servir de base pour proposer des hypothèses de mécanisme de pénétration du gypse en comparaison des altérations observées *in situ*, et éventuellement pour réaliser dans le futur des tests visant à reproduire en laboratoire une desquamation en plaques.

2.1. PROTOCOLES APPLIQUÉS

Pour le château de Chambord, les caractérisations du chapitre précédent tendent à proposer l'origine atmosphérique du gypse comme la source la plus probable sans pour autant en faire la démonstration. Plusieurs sources de polluants vont donc être testées ici, dont les protocoles d'application ont été décrits aux paragraphes 2.1. et 2.2. Parmi ces tests préliminaires, les plus pertinents ont été sélectionnés pour servir de base aux protocoles décrits ci-après.

À ces premiers paramètres de provenance et mode de formation du gypse, sont ajoutés d'autres paramètres liés à la morphologie des échantillons ainsi qu'au mode de séchage. Les différents paramètres de ces protocoles vont être présentés en expliquant les phénomènes attendus pour chacun d'eux et les hypothèses formulées.

L'objectif est de faire pénétrer le gypse au-delà de la surface, à la profondeur observée lors des caractérisations de prélèvements *in situ*.

Les échantillons utilisés ont été carottés dans du tuffeau d'Usseau, en cylindres de 2,5 cm de diamètres sur 3 cm de hauteur. L'ensemble des tests s'est déroulé à une température moyenne de 20°C.

2.1.1. SOURCES DE POLLUANTS ET MODES DE PENETRATION DES POLLUANTS

Les sources de polluants choisies ont été appliquées dans des proportions extrêmes, non réalistes, dans le seul but d'accélérer les mécanismes. Les protocoles sélectionnés d'après les tests préliminaires (Tableau 8 et Tableau 9) cherchent à reproduire les trois formes de dépôts décrits dans la littérature, soit par voie humide, soit par voie sèche :

- **Pollution atmosphérique par le dioxyde de soufre** (dépôt par voie sèche).
L'injection de dioxyde de soufre (SO_2) se fait à l'état sec sans vapeur d'eau dans un échantillon dont le vide a été préalablement fait. L'échantillon est donc saturé de gaz et après ouverture de l'enceinte, il est soumis à une imbibition capillaire d'eau distillée. Bien que la présence nécessaire de catalyseurs ait été mise en évidence lors de nombreux tests de sulfatation dans la littérature, les tests préliminaires présentés au début de ce chapitre ont montré qu'ils n'étaient pas strictement nécessaires, et il a été jugé préférable de ne pas les prendre en compte afin de limiter le nombre de paramètres à étudier dans les protocoles choisis.
- **Pollution atmosphérique par les pluies acides** (dépôt par voie humide).
L'apport d'acide sulfurique se fait par imbibition capillaire d'une solution d' H_2SO_4 à $\text{pH}=2$, cette valeur de pH étant la valeur critique en-dessous de laquelle l'efficacité de la réaction diminue, tout en permettant une dissolution de la calcite et une formation de gypse maximale.
- **Dépôt de particules de gypse par les pluies ou les ruissellements** (dépôt par voie humide).
L'apport de sulfate de calcium dihydraté se fait par une imbibition capillaire d'une solution eau + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à saturation, chauffée à 40°C pour permettre d'augmenter la quantité de gypse solubilisée. Le choix d'une solution saturée permet d'augmenter la possibilité de réaliser un dépôt de gypse, et d'éviter

sa dissolution lors des cycles successifs. Cette forme de dépôt peut représenter la présence de gypse à la surface de la pierre, qu'il ait été formé par apport atmosphérique, par action biologique, ou par le lessivage des mortiers.

Le début de ce chapitre a mis en évidence le fait que même lorsque les provenances sont multiples, le gypse se forme principalement en dépôt à la surface de la pierre.

Si l'on considère que le gypse se forme en surface, les différents modes possibles de pénétration du gypse en solution sont illustrés à la Figure 89 :

- (A) Le gypse pourrait pénétrer directement à travers le réseau poreux de la pierre lors d'un épisode de pluie. Quelle que soit la provenance du gypse, l'eau semble toujours le vecteur principal de l'altération. C'est elle qui participe à la formation du gypse dans la pierre et/ou à son déplacement. La plus grande solubilité du gypse (2 g/L), comparée à celle des autres phases cristallines composant la pierre (calcite : 0,013 g/L), pourrait potentiellement entraîner sa migration dans la pierre au fur et à mesure des cycles d'imbibition-séchage.
- (B) Le gypse pourrait aussi pénétrer dans la porosité des mortiers, différente de celle de la pierre, ou par l'interface pierre/mortier, pour ensuite atteindre la porosité de la pierre. Cette hypothèse ne sera pas abordée ici, afin de se consacrer dans un premier temps aux paramètres qui gravitent autour de la pierre uniquement.
- (C) Le gypse pourrait pénétrer par l'intermédiaire de fissures préexistantes, perpendiculaires et/ou parallèles à la surface de la pierre. La prise en compte de cette hypothèse sera présentée ci-après.

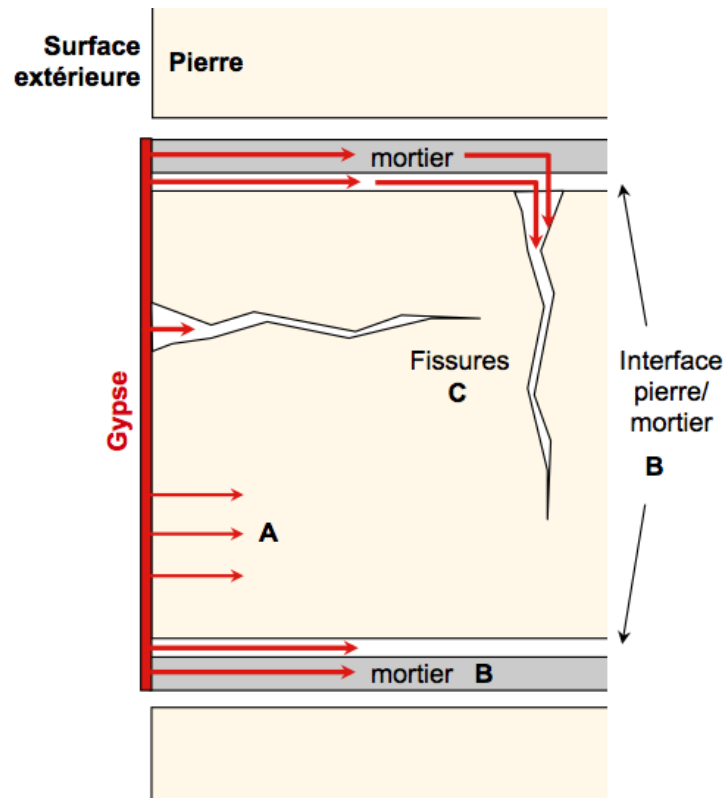


FIGURE 89 : HYPOTHESES DE PENETRATION DU GYPSE DANS LA PIERRE

2.1.2. PREPARATION DE L'ECHANTILLON, PROTOCOLE D'IMBIBITION/SECHAGE

À ce stade du diagnostic, il n'est pas possible de répondre aux questions sur le rôle du gypse :

- Est-il à l'origine de la fissure provoquant la desquamation de la pierre ?
- Est-il un élément aggravant d'une fissure préexistante ?
- N'a-t-il aucun rôle dans le processus de desquamation en plaques ?

Afin d'établir et de comprendre la relation qui existe entre le gypse et la fissure, plusieurs cas de figures ont été proposés. Les protocoles de simulation expérimentale choisis reposent sur une succession de cycles d'imbibition/séchage. Préalablement à ces cycles, les échantillons ont été préparés selon trois modes, visant à illustrer trois cas possibles qui pourraient avoir lieu *in situ*, comme le montre la Figure 90 :

- **Imbibition avec accès indirect à la fissure (1).** La fissure est parallèle à la surface soumise à l'imbibition (surface extérieure du parement), à 1 cm de

profondeur environ, et vise à simuler une fissure préalable au processus de formation et de migration du gypse dans la pierre.

- **Imbibition avec accès direct à la fissure (2).** La fissure est perpendiculaire à la surface soumise à l'imbibition, permettant de simuler certaines fissures que l'on peut observer sur les côtés de pilastres, laissant un accès direct aux sollicitations extérieures et une meilleure pénétration des agents polluants extérieurs.
- **Imbibition d'un échantillon non fissuré (3).** Il n'y a pas de fissure préalable, afin d'observer si l'accumulation préférentielle de gypse en profondeur de la pierre est possible en dehors de toute influence texturale.

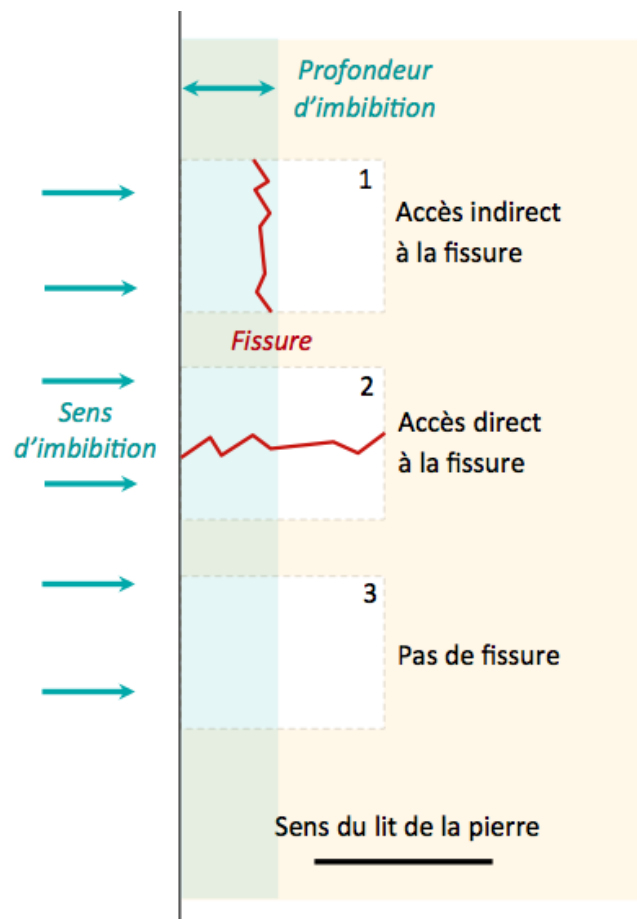


FIGURE 90 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES TROIS MODES DE PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les fissures ont été réalisées par fracturation de l'échantillon selon les deux plans recherchés. Pour éviter toute altération de la surface de fracture, les deux fragments obtenus

ont été immédiatement réassemblés à l'aide de fil en nylon. Les échantillons sont restés ainsi assemblés durant tout le reste du protocole et le fil en nylon n'a été retiré qu'à la fin des cycles d'imbibition/séchage, pour permettre le découpage et l'analyse des échantillons.

L'imbibition constitue l'apport d'eau et de polluant dont les variantes ont été décrites au paragraphe 2.1.1. De manière générale, cette imbibition se fait :

- Par capillarité jusqu'à la moitié de la hauteur de l'éprouvette, i.e. 1,5 cm de hauteur : l'échantillon est posé sur une grille en contact avec la solution, assurant une seule interface eau/pierre pour reproduire un cas réel de pénétration de l'eau dans le tuffeau posé en parement lors d'un épisode de pluie. Le front d'imbibition dépasse la fissure du cas (1).
- Dans un sens parallèle au sens du lit, pour reproduire le sens du lit d'une pierre en place dans un mur sur le monument.

Le séchage se fait dans une étuve chauffée à 40°C pour éviter toute transformation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). L'échantillon est considéré comme sec lorsque sa masse ne varie plus. L'objectif est d'obtenir une cristallisation du gypse à l'intérieur de la pierre.

Trois protocoles de séchage ont été adoptés et sont résumés à la Figure 91 :

- Sans isolation : l'évaporation se fait alors dans toutes les directions comme dans le cas de pierres d'angles ou de sculptures
- Avec isolation de toutes les faces par une membrane isolante à l'exception de la face soumise à l'imbibition. L'isolation est définie ici comme étant « à l'endroit », à l'instar d'une pierre posée en parement.
- Avec isolation de toutes les faces par une membrane isolante à l'exception de la face opposée à celle soumise à l'imbibition. L'isolation est définie ici comme étant « à l'envers », dans le cas d'un séchage du parement vers l'intérieur, le tuffeau étant très perméable.

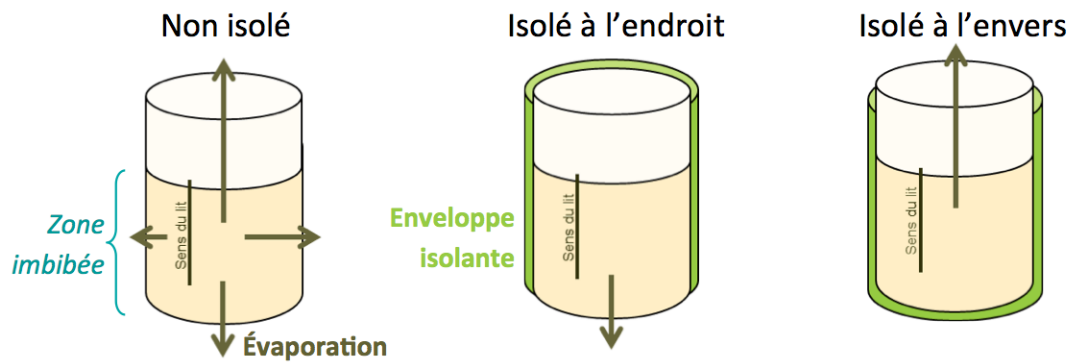


FIGURE 91 : PROTOCOLES DE SECHAGE ADOPTES

Les membranes isolantes n'ont été disposées sur les échantillons qu'au moment du séchage, les échantillons en étant libérés au moment de l'imbibition.

2.1.3. SUCCESSION DES CYCLES ET SUIVI DE L'ALTERATION

Ces cycles d'imbibition/séchage ont été reproduits durant **dix cycles**, afin d'établir un premier constat de leur efficacité. En comparaison, d'autres échantillons ont été analysés après le **premier cycle**. Enfin, deux autres types de tests ont été réalisés :

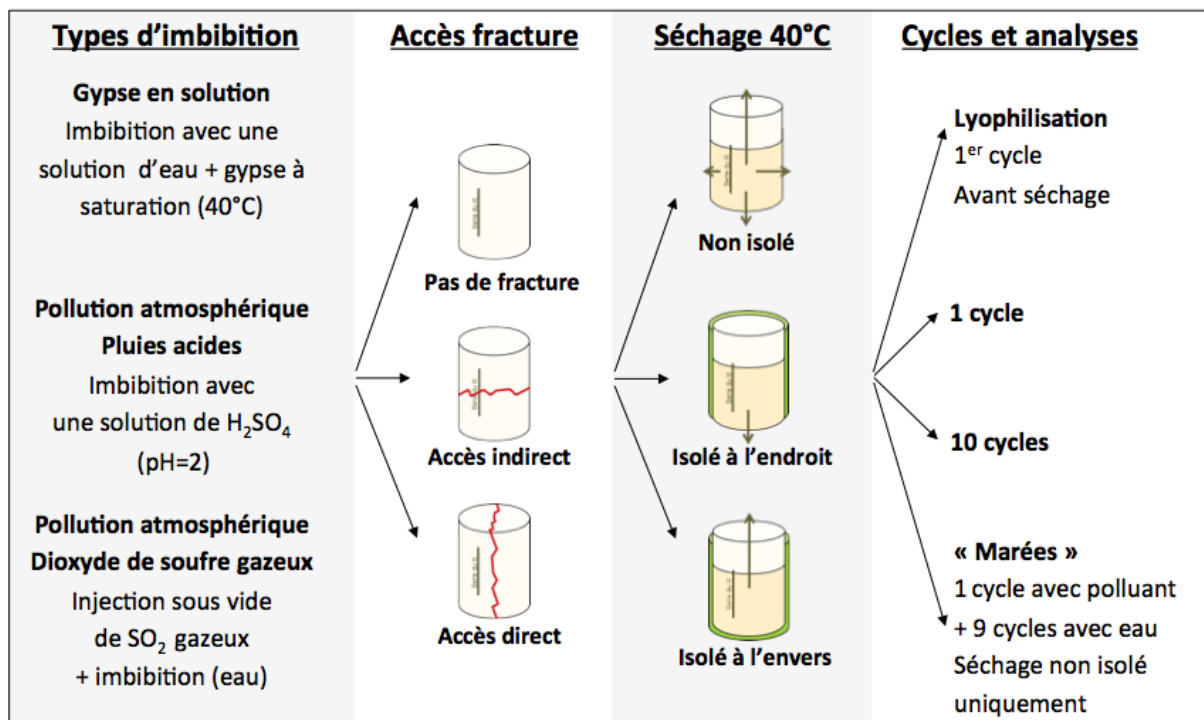
- En exploitant le phénomène de « **marée** », pour observer la capacité de remobilisation du gypse déposé en surface : après un premier cycle d'imbibition/séchage avec apport de polluants, les neuf cycles suivants ont été simplement réalisés par imbibition avec de l'eau pure avant le séchage.
- Par **lyophilisation** des échantillons, pour s'affranchir des phénomènes liés au séchage provoquant d'éventuelles migrations de sels en surface durant l'évaporation : après la première imbibition avec apport de polluant, l'échantillon n'a pas été mis à sécher, mais congelé dans l'azote liquide puis lyophilisé. L'objectif est d'observer la localisation des sulfates dans la pierre directement après l'imbibition et avant séchage.

En cours des cycles, un suivi photographique des échantillons a été réalisé. Les échantillons ont été pesés à la fin de chaque cycle, ainsi qu'à chaque étape d'un cycle, avant et

après imbibition, ainsi qu'avant et après la mise en place de la membrane isolante pour la phase de séchage pour les échantillons concernés.

À la fin des différents cycles, les échantillons ont été découpés pour être analysés par diffraction de rayons X selon un profil de profondeur, afin de détecter ou non la présence de gypse. Ces analyses ont ensuite été complétées par des mesures quantitatives des sulfates en chromatographie ionique pour permettre une meilleure comparaison des résultats entre eux.

Le Tableau 11 récapitule les différents paramètres étudiés, faisant varier les sources de polluants, le mode de préparation des échantillons, le mode de séchage et les différents types de cycles. Pour les essais à un seul cycle et ceux à dix cycles, vingt-sept échantillons ont été testés pour chacun. Auxquels s'ajoutent neuf échantillons non isolés lors du séchage simulant le phénomène de marée, et neuf échantillons qui n'ont pas subi de séchage et qui ont été analysés après lyophilisation. Au total, soixante-douze échantillons ont été analysés, correspondant à autant de cas de figure différents.



TABEAU 11 : RECAPITULATIF DES DIFFERENTS PROTOCOLES REALISES

2.2. RESULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les remarques présentées ici, qu'elles soient le résultat d'observations ou de mesures, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, ou encore qu'elles soient à l'échelle macroscopique ou microscopique, visent à mettre en évidence l'influence des différents paramètres sur la distribution du gypse à l'intérieur de la pierre.

2.2.1. OBSERVATIONS

2.2.1.1. CONSTATS VISUELS

Le suivi visuel des échantillons au cours des cycles et les observations faites à la fin des tests permettent de mettre en évidence plusieurs points résumés dans le Tableau 12.

		Test gypse	Test H ₂ SO ₄	Test SO ₂
Surface soumise à l'imbibition	Echantillons non isolés	Dépôt blanc	Dépôt blanc	Aucune modification visible
	Echantillons isolés	Induration de la surface constatée lors du sciage des échantillons	Induration de la surface constatée lors du sciage des échantillons	
Surfaces latérales situées dans la zone imbibée	Echantillons non isolés	Aucune modification visible	Efflorescences blanches	Aucune modification visible
	Echantillons isolés	Aucune modification visible		
Autres surfaces		Aucune modification visible		

TABLEAU 12 : SYNTHÈSE DES MODIFICATIONS TEXTURALES DE SURFACE OBSERVÉES

Observée lors du sciage, l'induration superficielle semble être plus importante et sur une plus large épaisseur pour les échantillons traités au H₂SO₄ (1 mm environ) que pour ceux imbibés avec la solution eau + gypse.

Les observations réalisées indiquent que des modifications et des réactions se produisent en plus grande part lorsque l'échantillon est mis à sécher sans film étanche sur les surfaces latérales.

2.2.1.2. CINÉTIQUE D'IMBIBITION

Concernant les temps d'imbibition, le front d'imbibition des échantillons non fissurés s'élève selon un plan horizontal, avec un temps moyen de 2 minutes et 30 secondes pour atteindre la hauteur limite du front d'imbibition imposée à 1,5 cm. Dans le cas des échantillons préfissurés de manière parallèle à ce front d'imbibition (mode de fissuration nommé « accès indirect »), la migration de l'eau se fait également de manière régulière, mais la cinétique est ralentie à l'approche de la fissure. Enfin, dans le cas des autres échantillons préfissurés (sens « accès direct »), le front d'imbibition est irrégulier, et la vitesse est augmentée par la présence de la fissure, qui forme un pore vertical de grande taille favorisant l'ascension capillaire. Ces variations de temps d'imbibition sont généralement inférieures à 30 secondes.

La cinétique d'imbibition des échantillons ayant subi le protocole de « marées » n'est pas modifiée au cours des cycles, et le temps d'imbibition est en moyenne de 2 minutes et 30 secondes à chaque cycle.

Au cours des dix cycles effectués avec apport de polluant à chaque cycle, on constate que le temps d'imbibition :

- n'augmente que très peu dans le cas des échantillons traités au SO_2 , et il ne dépasse pas 4 minutes,
- augmente de manière plus significative dans le cas des échantillons imbibés avec la solution eau+gypse, quel que soit le protocole de préparation des échantillons, mais ne dépasse pas 7 minutes,
- est de plus en plus long au fil des cycles pour les échantillons soumis à la solution de H_2SO_4 . Cependant, pour ce polluant, le mode de séchage utilisé semble influencer sur la cinétique d'imbibition, comme le montre le Tableau 13, dont les valeurs correspondent aux échantillons non préfissurés.

Ech. non fissuré H_2SO_4	Cycle 1	Cycle 5	Cycle 10
Pas d'isolation	2 min 30 s	13 min	27 min
Isolé à l'endroit	2 min 30 s	16 min 30 s	45 min
Isolé à l'envers	2 min 30 s	18 min 30	50 min

TABLEAU 13 : TEMPS D'IMBIBITION MESURES POUR LES ECHANTILLONS NON FISSURES ET IMBIBES AVEC LA SOLUTION DE H_2SO_4

Le ralentissement de la cinétique d'imbibition peut être corrélé avec les modifications de l'état de surface des échantillons observés précédemment, et notamment le dépôt blanc en surface des échantillons (Prick, 1996) :

- Les échantillons traités au SO_2 ne présentent pas de modification visible de la surface d'imbibition, et leur cinétique d'imbibition n'est pas modifiée,
- Pour les échantillons soumis à des imbibitions de solution eau+gypse, la sub-surface est concernée par un dépôt blanc et une induration, et la cinétique est légèrement ralentie, peut-être en raison de ce dépôt de gypse en surface
- Enfin, Les échantillons soumis à une imbibition avec une solution de H_2SO_4 semblent avoir subi une modification de la surface d'imbibition sur une épaisseur plus importante, ce qui a une répercussion sur la cinétique d'imbibition qui est fortement ralentie.

2.2.2. MODIFICATIONS TEXTURALES DE L'ETAT DE SURFACE

Les premiers résultats s'intéressent aux modifications texturales observées et mesurées en surface pour les trois différents protocoles de sources de gypse, en comparaison de l'état de surface d'un échantillon de tuffeau sain de référence. Il s'agit de l'état de la surface soumise à l'imbibition, après dix cycles d'imbibition/séchage, des échantillons non pré-fissurés et non isolés durant le séchage. Pour chaque protocole de sources de gypse, les états de surface imbibée des échantillons pré-fissurés et isolés durant le séchage sont similaires à ceux présentés ici.

La confrontation des observations faites au MEB et de l'indice de rugosité mesuré au profilomètre est complétée par des mesures semi-quantitatives du pourcentage de soufre au MEB-EDX, et par des mesures quantitatives du pourcentage massique de gypse faites en chromatographie ionique. Toutes les informations sont résumées dans le Tableau 14.

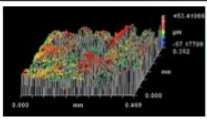
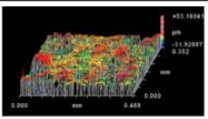
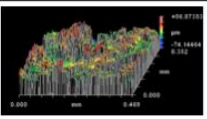
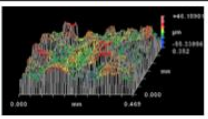
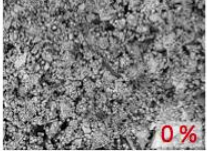
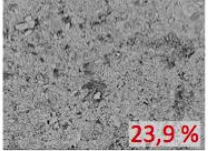
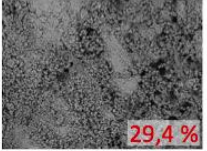
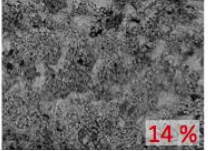
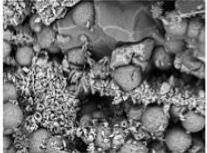
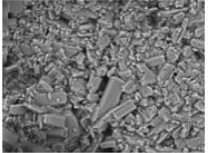
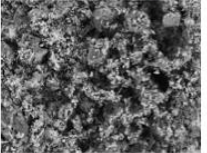
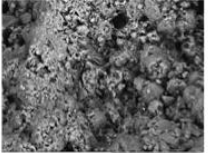
Méthode d'analyse		Tuffeau Sain	Test gypse	Test H ₂ SO ₄	Test SO ₂
Profilomètre	Rugosité moyenne Ra (μm)	9,08	5,62	10,22	10,07
	Ecart-type	0,86	0,96	1,54	1,85
	Image				
MEB	X 200 % de soufre (relatif aux éléments Ca, Si, Na, Mg, Al, Cl, P, K, Ti, Fe) 500 μm				
	X 1500 50 μm				
Chromato-graphie ionique	% massique de gypse (sur 1 mm d'épaisseur en surface)	-	3,98 %	25,37 %	2,85 %

TABLEAU 14 : DONNEES DE L'ETAT DE SURFACE DES ECHANTILLONS TESTES A 10 CYCLES D'IMBIBITION/SECHAGE SELON LES TROIS PROTOCOLES DE SOURCES DE GYPSE

Concernant la rugosité de surface, quinze mesures ont été faites aléatoirement sur la surface de l'échantillon, l'indice de rugosité étant calculé pour chaque mesure sur une surface de 0,5 x 0,5 mm environ¹²⁵. Le Tableau 14 présente la moyenne et l'écart-type obtenus par ces mesures sur les différents états de surface. L'écart-type permet de se rendre compte de la variabilité des mesures. On constate que les échantillons soumis à des imbibitions de solution eau+gypse voient la rugosité de leur surface imbibée diminuer presque de moitié par rapport à celle d'un échantillon sain non traité. Les échantillons soumis aux solutions de H₂SO₄ ou au SO₂ gazeux ont un indice de rugosité légèrement supérieur à celui d'un échantillon non traité. En revanche, l'écart-type est beaucoup plus important pour ces deux derniers tests que pour les cycles réalisés avec la solution eau+gypse.

En dehors de toute valeur absolue, les mesures quantitatives et semi-quantitatives réalisées et comparées respectivement entre elles, montrent des disparités au niveau de leurs proportions. Ceci s'explique par le fait que pour les mesures de pourcentage massique de gypse en chromatographie ionique, l'échantillonnage prélevé a été réalisé sur le premier millimètre à la surface pour une surface d'1 cm² environ. Pour les analyses semi-quantitatives à l'analyse élémentaire EDX faite au microscope électronique à balayage, c'est une surface de

¹²⁵ Analyses effectuées avec un profilomètre Zygo NewView 7100 à interférométrie en lumière blanche. L'écart moyen de rugosité Ra est la moyenne arithmétique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base.

la taille de l'image qui a été analysée (un peu plus de 0,5 mm de côté), sur une épaisseur correspondant à la poire de diffusion des électrons qui est de l'ordre du micron¹²⁶. La zone analysée n'est donc pas la même, et cette disparité de proportion peut traduire une différence de localisation du gypse.

Les différences de rugosité, bien corrélées par les observations de ces mêmes surfaces au microscope électronique à balayage, peuvent être interprétées comme suit, en complément des mesures semi-quantitatives et quantitatives :

- Dans le cas des cycles d'imbibition avec la solution d' H_2SO_4 , il semblerait que le gypse néoformé ait remplacé la calcite dissoute en surface. C'est pourquoi la rugosité n'a que peu changé, les cristaux de gypse ne remplissant pas les grands pores de surface de la pierre. Néanmoins, les temps d'imbibition ayant fortement augmenté, il est possible que la taille moyenne des pores ait été modifiée plus en profondeur, provoquant une diminution de la cinétique d'imbibition. Les observations au microscope électronique à balayage montrent une répartition relativement régulière des cristaux de gypse. Cependant, l'écart-type de l'indice de rugosité, plus important ici que pour les mesures sur le tuffeau sain, est probablement dû au fait que les agglomérats de gypse peuvent être présents localement, accentuant la rugosité de surface. Les valeurs quantitatives obtenues en chromatographie ionique (> 25%) suggèrent que le gypse est présent sur un millimètre d'épaisseur, au minimum, en surface.
- Dans le cas des cycles d'imbibitions de solutions **eau+gypse**, les cristaux de gypse se localisent dans les pores de surface, jusqu'à les colmater, ce qui tend à réduire l'indice de rugosité. Les images obtenues au microscope électronique à balayage montrent une surface homogène de cristaux de gypse qui recouvrent entièrement les minéraux constitutifs du tuffeau. Le dépôt blanc observé précédemment en surface est donc bien constitué de cristaux de gypse. Les valeurs semi-quantitatives données par les analyses élémentaires par EDX montrent des proportions relatives de soufre comparables à ceux des échantillons imbibés au H_2SO_4 , alors que les analyses chromatographiques montrent une teneur en gypse autour de 4 % massique, bien inférieure aux 25 % mesurés pour

¹²⁶ Le pourcentage de soufre mesuré est relatif aux éléments suivants : Ca, Si, Na, Mg, Al, Cl, P, K, Ti, Fe, potentiellement présents dans le tuffeau. Les éléments C et O n'ont pas été pris en compte, c'est pourquoi le pourcentage de gypse ne doit pas être calculé par rapport au pourcentage de soufre mesuré ici par EDX, et que ces pourcentages de soufre ne doivent pas être comparés avec ceux de gypse, mesurés en chromatographie ionique.

les échantillons traités au H_2SO_4 . On peut donc imaginer que pour les échantillons imbibés avec la solution eau+gypse, le gypse se dépose dans les premiers micromètres de la pierre. Cette donnée est d'ailleurs corrélée par le découpage des échantillons laissant apparaître une induration de surface sur une épaisseur beaucoup plus fine que pour les échantillons traités au H_2SO_4 .

- Dans le cas des cycles réalisés avec le SO_2 , les mêmes observations peuvent être faites que pour ceux réalisés avec le H_2SO_4 , le gypse néoformé ne vient que peu colmater la porosité, et remplace la calcite dissoute. En revanche, la cinétique d'imbibition n'étant que peu modifiée au cours des cycles, cette cristallisation en surface doit probablement être différente de celle des échantillons traités au H_2SO_4 pour qui le temps d'imbibition a considérablement augmenté entre les cycles 1 et 10. Le gypse formé semble être présent sur une plus grande épaisseur que pour l'échantillon soumis à la solution eau+gypse, mais les proportions sont plus faibles que pour les échantillons traités au H_2SO_4 .

2.2.3. CORRELATION ENTRE PRISE DE MASSE ET FORMATION DE GYPSE – INFLUENCE DU MODE D'APPORT DE POLLUANT

L'accumulation ou la formation de gypse à la surface ou à l'intérieur de la pierre peut être évaluée dans un premier temps à partir de la prise de masse de l'échantillon en fonction des cycles.

Cette prise de masse peut être mise en parallèle avec les teneurs en gypse mesurées par chromatographie ionique à différentes profondeurs de l'échantillon, depuis la surface soumise à l'imbibition, jusqu'à la face opposée. L'analyse systématique préalable de ces échantillons en diffraction de rayons X a permis de vérifier que tous les sulfates mesurés en chromatographie ioniques étaient présents sous la forme de sulfate de calcium dihydraté (i.e. de gypse) uniquement.

2.2.3.1. MODE D'APPORT DE SOUFRE

La Figure 92 illustre le pourcentage de prise de masse relative aux cycles 1 à 10, des vingt-sept échantillons représentatifs des différents paramètres testés. Les valeurs utilisées sont celles des échantillons secs, à chaque fin de cycle, après stabilisation de la masse.

Pour tous les échantillons, on observe une augmentation continue de cette prise de masse au cours des cycles. Dès le premier cycle, la tendance est claire et sépare les différentes sources de polluants : la prise de masse la plus importante concerne les échantillons imbibés avec une solution d' H_2SO_4 (6 % en moyenne au dixième cycle), la prise de masse la plus faible concerne les échantillons imbibés avec une solution eau+gypse (environ 1 %), et enfin, les échantillons ayant subi l'injection de SO_2 gazeux ont une prise de masse moyenne d'environ 3 %.

Les échantillons étant secs à la fin de chaque cycle, on peut estimer que la prise de masse est bien due, et ce de façon proportionnelle, au gypse résiduel formé ou accumulé dans la totalité de l'échantillon. Cependant, il s'agit d'une teneur globale, et seules les analyses quantitatives locales peuvent déterminer la distribution de la teneur en gypse dans l'échantillon.

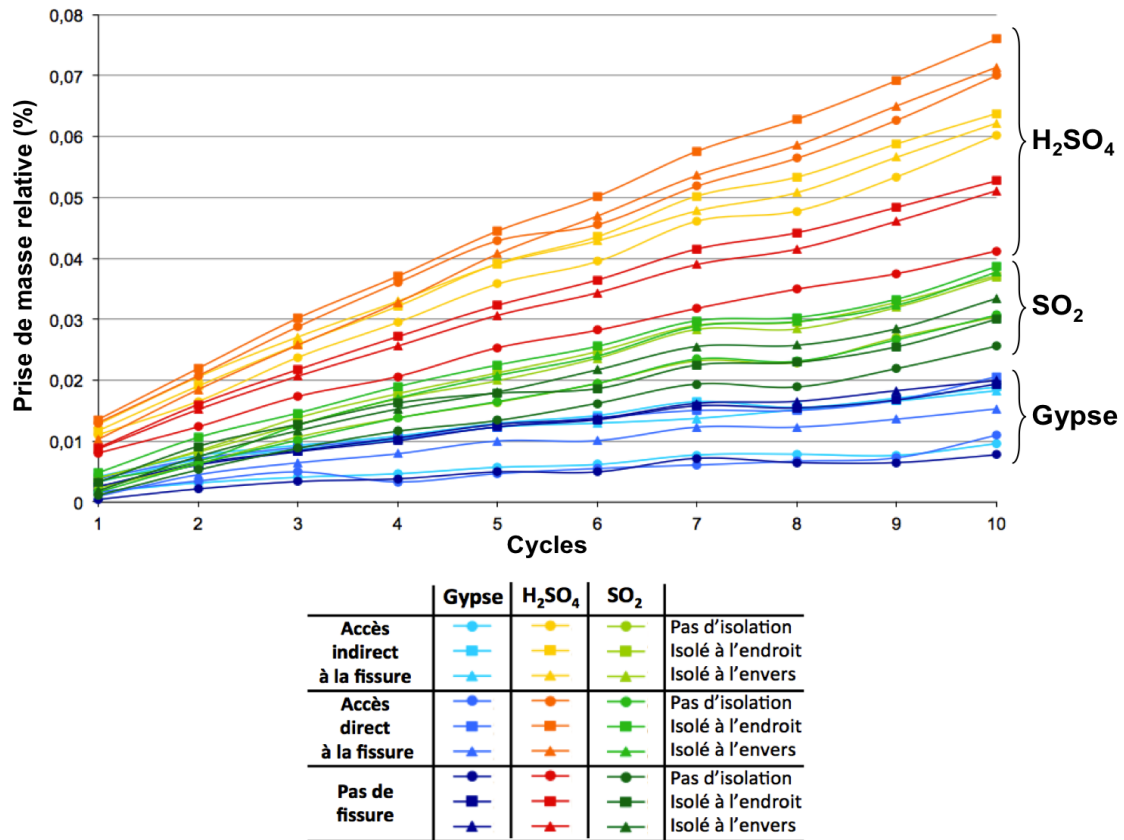


FIGURE 92 : POURCENTAGE DE PRISE DE MASSE RELATIVE DE CHAQUE ECHANTILLON DES CYCLES 1 A 10

Les échantillons ont ensuite été découpés afin de prélever des échantillons à différentes profondeurs de la pierre, analysées en diffractions de rayons X puis en chromatographie ionique. En fonction des modes de préparation des échantillons, les prélèvements ont été réalisés en surface et à cœur des échantillons par grattage de la pierre sur un volume de $0,1\text{cm}^3$ environ. La Figure 93 illustre la localisation des prélèvements :

- Pour l'échantillon non fissuré, la surface d'imbibition ainsi que celle opposée ont été grattées. Ces surfaces sont les mêmes que celles des échantillons fissurés. Concernant le cœur des échantillons, l'échantillon non fissuré a été fracturé en deux, sans sciage, et deux zones ont été sélectionnées, l'une à 1 cm de la surface, se trouvant dans la zone imbibée, l'autre à 2 cm dans la zone non imbibée.
- Pour l'échantillon fissuré selon un « accès direct », les deux moitiés de l'échantillon ont été séparées suivant la fissure, et deux hauteurs ont été également prélevées, à 1 cm et à 2 cm.
- Pour l'échantillon fissuré de manière indirecte, les deux moitiés de l'échantillon ont été séparées et la pierre a été prélevée de part et d'autre de la fissure, située dans la zone imbibée, à la limite du front d'imbibition.

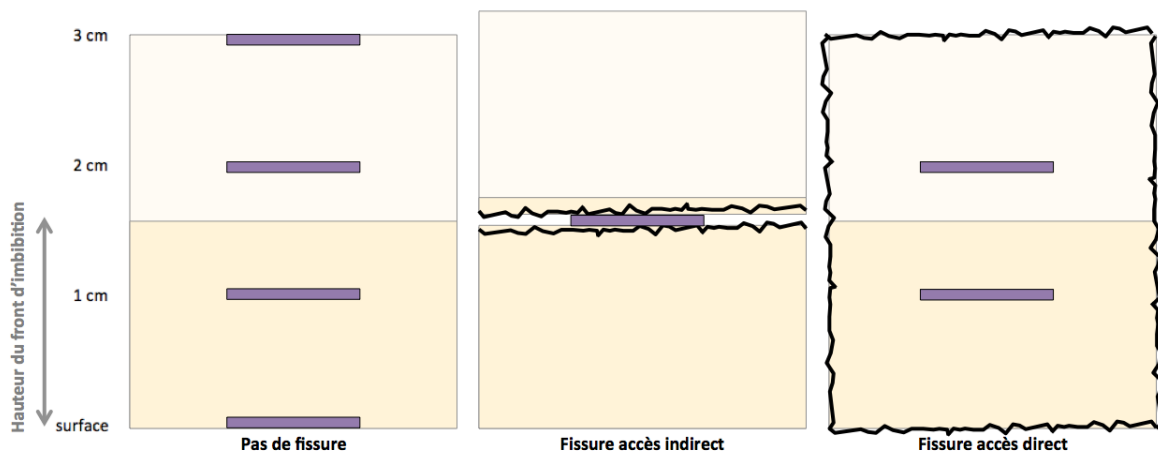


FIGURE 93 : PRELEVEMENT DE MATIERE SUR LES ECHANTILLONS VUS EN COUPE

À la Figure 94 sont représentés les pourcentages de gypse mesurés dans les échantillons après dix cycles pour chacune des trois sources de polluants. Il s'agit des échantillons non fissurés et non isolés lors du séchage, ces paramètres seront évoqués dans un deuxième temps. La partie droite de la figure représente les teneurs massiques en gypse en fonction de

la profondeur d'analyse. En partie gauche de la figure, ces teneurs en gypse sont symbolisées, sur une représentation de l'échantillon, par des cercles dont l'aire est proportionnelle à la quantité de gypse mesurée, afin de rendre compte plus aisément de la répartition du gypse dans la pierre.

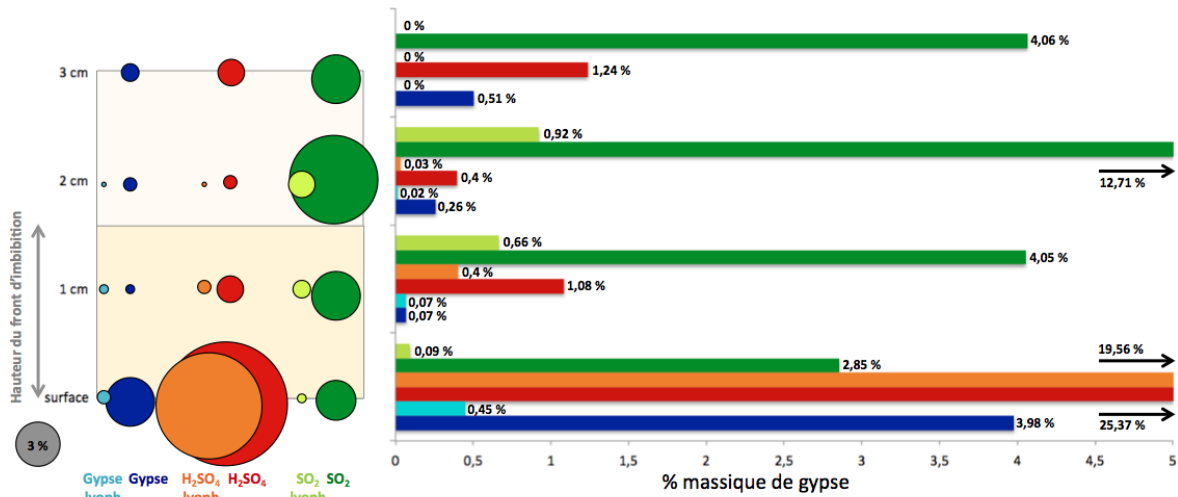


FIGURE 94 : REPRESENTATION DES TENEURS MASSIQUES DE GYPSE CONTENUES DANS LES ECHANTILLONS NON FISSURES LYOPHILISES APRES LA PREMIERE IMBIBITION, EN COMPARAISON DES ECHANTILLONS AYANT SUBI 10 CYCLES IMBIBITION/SECHAGE AVEC UN SECHAGE AVEC SURFACES NON-ISOLEES

Si l'on traite conjointement la prise de masse des échantillons présentée à la Figure 92 et la répartition du gypse dans la pierre illustrée à la Figure 94, on peut en déduire de premières observations sur l'accumulation du gypse dans la pierre et la localisation préférentielle adoptée selon les sources de polluants testées :

- Dans le cas des échantillons imbibés avec une solution eau+gypse, le pourcentage de prise de masse est faible (1 %), et l'accumulation de gypse se fait presque exclusivement en surface (4 % massique de gypse environ). Les teneurs en gypse mesurées dans la pierre sont inférieures à 0,5 %, le gypse se localisant uniquement en surface et étant très peu mobilisé à cœur. Ce résultat est indépendant du faible nombre de cycles réalisés. Des tests de vieillissement artificiels décrits dans la littérature ont utilisé des solutions eau+gypse à saturation pour effectuer des cycles d'imbibition/séchage sur des tuffeaux (Prick, 1996 ; Pauly, 1990). Les cent cycles ont été dépassés, et aucune pénétration de gypse n'a été observée au-delà du premier millimètre.

- Dans le cas des échantillons imbibés avec une solution d' H_2SO_4 , la prise de masse est la plus importante à l'issue des dix cycles. Le gypse suit la même répartition que pour les solutions eau+gypse, c'est-à-dire principalement à la surface d'imbibition, mais dans des proportions beaucoup plus importantes, soit plus de 25 % massique de gypse en surface, et autour de 1 % à cœur. L'action de H_2SO_4 crée une croûte fortement gypseuse en surface, sans pour autant affecter la profondeur de manière significative. C'est ce phénomène qui est mis en valeur dans la littérature dans le cas des tests de sulfatation répertoriés dans le tableau 10, qu'ils soient réalisés avec des solutions d' H_2SO_4 ou bien du SO_2 gazeux dans une atmosphère humide formant du H_2SO_4 en surface de la pierre. Comme précisé précédemment, ces tests n'ont pas montré l'accumulation de gypse ailleurs qu'en surface, même après un nombre de cycles et un temps d'exposition important.
- Dans le cas des échantillons soumis au SO_2 , la prise de masse globale des échantillons se situe dans la moyenne des trois polluants. Cependant, la répartition de gypse suit une distribution complètement différente de celle des deux autres polluants. C'est en surface de l'échantillon que la quantité de gypse formé est la moins importante (même si elle n'est pas négligeable pour autant, avec un pourcentage massique de 2,85 %). À l'inverse, c'est au cœur de la pierre que se trouvent les concentrations de polluant les plus importantes (entre 4 et 12 % massique de gypse). Il est aussi intéressant de remarquer que dans le cas du SO_2 , la teneur en gypse est la plus forte dans la zone qui correspond à la limite de montée de la frange capillaire d'eau liquide qui se situe vers 2 cm de profondeur, un peu après la limite du front d'imbibition située à 1,5 cm. Par ailleurs, la teneur non négligeable (vers 4 % de gypse en masse) sur la face opposée à l'imbibition montre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir la présence d'un front l'eau liquide pour la formation du gypse. Le front d'imbibition liquide s'arrête mais la vapeur d'eau peut continuer à progresser, et lorsqu'elle se condense, former de l'eau liquide dans la porosité la plus fine.

En parallèle de ces mesures quantitatives sont indiquées les quantités de gypse mesurées dans des échantillons ayant subi un autre protocole : une lyophilisation directement après la première imbibition, avant tout séchage.

L'objectif de cette lyophilisation était :

- De vérifier que la réaction de formation du gypse et/ou son accumulation étaient des réactions rapides, à l'échelle de quelques minutes, c'est à dire le temps nécessaire à l'imbibition suivie de la congélation dans l'azote liquide. Même si les quantités sont moindres pour les échantillons lyophilisés que pour les échantillons ayant subi dix cycles, le gypse s'est formé et accumulé avec tous les polluants testés, dans l'ensemble de l'échantillon.
- D'observer la répartition de ce gypse dans la pierre dès le premier apport de polluant, de manière à s'affranchir du phénomène de séchage et donc des mouvements des solutions liquides dans la porosité, qui pourraient être responsables de migrations de sels en surface. On remarque à la Figure 94 que pour chaque mode d'apport de soufre, la répartition du gypse en fonction de la profondeur est la même pour les échantillons lyophilisés après la première imbibition que pour ceux ayant subi dix cycles, les quantités étant bien entendu plus importantes après 10 cycles.

Enfin, pour les échantillons ayant subi le protocole de « marées », le pourcentage de prise de masse augmente légèrement au premier cycle, puis reste relativement stable au cours des cycles suivants, confirmant que le gypse formé ou accumulé provient uniquement du premier cycle avec apport de polluant (Figure 95). Ces valeurs de gypse mesurées sont basses, et comparables avec celles mesurées pour les échantillons lyophilisés après la première imbibition ou ceux ayant subi un seul cycle d'imbibition/séchage. Après les neuf cycles réalisés avec de l'eau distillée, on constate que le gypse formé et accumulé dans la pierre au cours du premier cycle est localisé aux mêmes endroits et dans les mêmes proportions qu'après dix cycles d'imbibition/séchage avec polluants ou après imbibition unique et lyophilisation. Ceci permet de mettre en évidence que les mouvements d'eau imposés par les neuf cycles d'imbibition/séchage ne sont pas suffisants pour remobiliser le gypse. Le gypse accumulé en surface ne peut pas conduire, avec un nombre limité d'imbibitions capillaires, à une migration significative de ce gypse au cœur de la pierre.

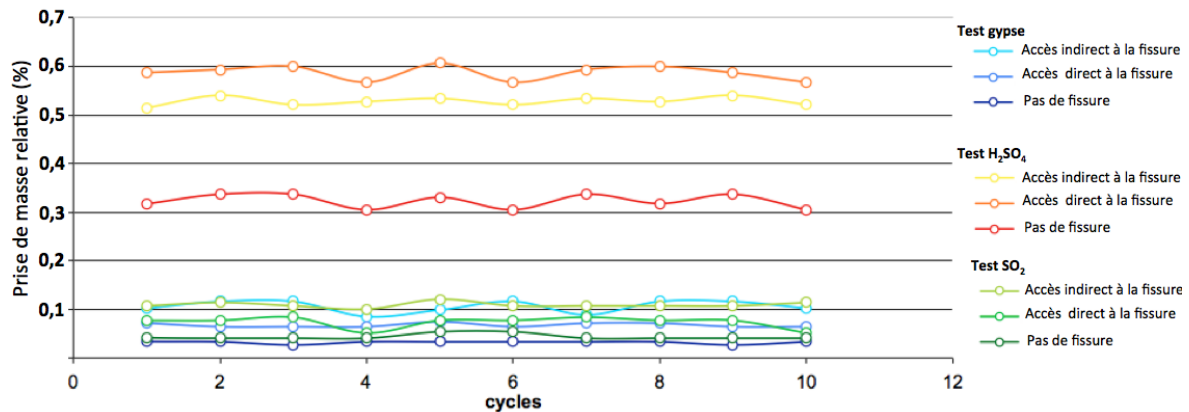


FIGURE 95 : POURCENTAGE DE PRISE DE MASSE RELATIVE DE CHAQUE ECHANTILLON IMBIBES AVEC LE PROTOCOLE DE « MAREES », DES CYCLES 1 A 10

2.2.3.2. LE CAS DU SO_2

Dans le cas des échantillons traités au SO_2 , on peut s'interroger sur la quantité de gaz qui a pénétré dans chaque échantillon. La concentration n'a pas été mesurée, mais il est possible d'avoir une estimation des proportions par pesées des échantillons avant et après injection du SO_2 , étant donné que le SO_2 gazeux, plus dense, a remplacé l'air dans l'espace poreux des échantillons. Rapportées à la masse initiale, ces valeurs sont alors comparables entre elles comme les valeurs de prises de masse totales présentées précédemment. La Figure 96 illustre le pourcentage de prise de masse propre à chaque cycle pour les différents échantillons.

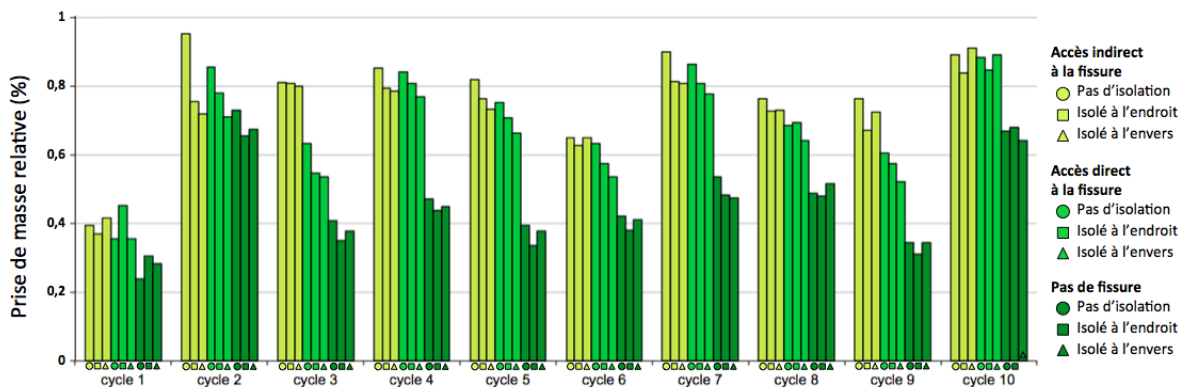


FIGURE 96 : POURCENTAGE RELATIF DE PRISE DE MASSE EN SO_2 DE CHAQUE ECHANTILLON DES CYCLES 1 A 10 POUR LE PROTOCOLE D'INJECTION DE SO_2 SUIVIE D'UNE IMBIBITION D'EAU

On observe pour la toute première injection de SO_2 une prise de masse moins importante pour ce cycle que pour tous les suivants. Pour ce premier cycle, la quantité de SO_2 semble comparable en moyenne d'un échantillon à l'autre. Ce calcul a été effectué sur tous les

autres échantillons ayant subi l'influence du SO_2 au premier cycle, mais pour des protocoles différents (1 cycle, « marée », lyophilisation), et le pourcentage de prise de masse est le même que pour les échantillons présentés sur la figure, avec une moyenne autour de 0,3%.

À partir du cycle 2, une tendance semble se dessiner pour les différents groupes d'échantillons : l'absence de fissure limite la quantité de SO_2 qui pénètre dans l'échantillon (prise de masse de 0,5 %). Les molécules de gaz pénètrent dans la porosité et la présence d'une fissure semble augmenter la prise de masse en SO_2 des échantillons (environ 0,7 %).

La différence entre le premier cycle, suivie d'une relative constance pour les cycles suivants, conduit à conclure que l'échantillon semble saturé à partir du deuxième cycle.

2.2.4. CORRELATION ENTRE PRISE DE MASSE ET FORMATION DE GYPSE – INFLUENCE DES PARAMETRES DE SECHAGE ET DE FISSURATION DE L'ECHANTILLON

Les figures suivantes illustrent également l'importance relative des différents paramètres, à partir des données quantitatives de pourcentages massiques de gypse mesurés. La proportion a été conservée d'une figure à l'autre, les données représentées par les cercles sur les schémas des échantillons sont donc comparables entre elles.

2.2.4.1. INFLUENCE DU MODE D'ISOLATION LORS DU SECHAGE

De manière générale, les prises de masse observées montrent que l'isolation de l'échantillon lors du séchage permet une formation ou une rétention de gypse plus importante que dans un échantillon non isolé lors du séchage (Figure 92). Cependant, dans le cas des échantillons non pré-fissurés, les teneurs massiques de gypse mesurées à quatre profondeurs de l'échantillon ne permettent pas de mettre en évidence ce phénomène.

En effet, dans le cas des échantillons imbibés avec des solutions **eau+gypse** (Figure 97) ou d' H_2SO_4 (Figure 98), les conclusions rapportées précédemment sur les échantillons non isolés lors du séchage s'appliquent également aux échantillons dont le séchage s'est fait avec des surfaces isolées, que ce soit « à l'endroit » ou « à l'envers ». Le gypse s'accumule donc principalement sur la surface d'imbibition, beaucoup moins à 1 cm de profondeur, et encore moins à 2 cm de profondeur. En revanche, là où les deux modes d'isolation pourraient avoir un rôle, c'est en ce qui concerne la face opposée à la surface imbibée, l'isolation « à l'envers »

permettant la migration et donc la formation d'une plus grande quantité de gypse vers cette face. Cependant, les différences de teneurs en gypse entre les deux modes de séchage sont inférieures à 1 %, ce qui rend cette tendance peu significative. Ainsi, il semblerait que le sens de migration de l'eau lors du séchage, sous forme liquide pouvant véhiculer les sels et sous forme vapeur, n'ait que peu de rôle dans la localisation du gypse dans la pierre. Ceci confirme le fait le gypse n'est pas facilement mobilisable lors des migrations de solutions lors du séchage, et surtout que c'est l'étape d'imbibition qui a le plus d'importance pour la localisation de ce sel dans ces cas-là. Enfin, les échantillons lyophilisés ont montré que le gypse est localisé aux mêmes endroits et dans les mêmes proportions avant et après séchage, ce qui constitue un dernier argument en faveur du peu d'influence des protocoles de séchage étudiés sur la localisation du gypse durant les cycles d'imbibition/séchage, pour le cas des sources de polluants par eau+gypse et par H_2SO_4 .

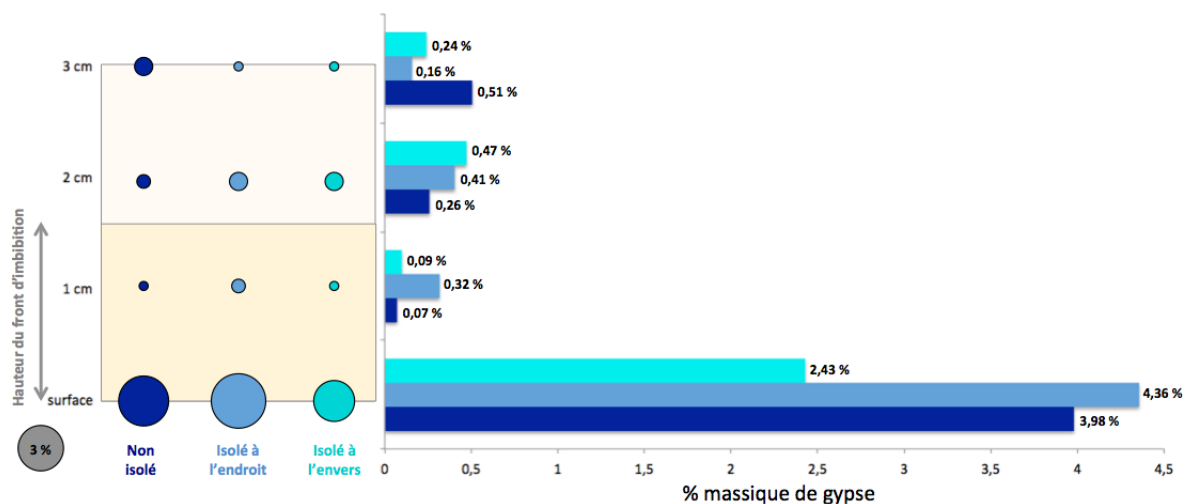


FIGURE 97 : REPRESENTATION DES TENUEURS MASSIQUES DE GYPSE CONTENUES DANS LES ECHANTILLONS NON PREFISSURES AYANT SUBI 10 CYCLES AVEC UNE SOLUTION EAU+GYPSE ET COMPARAISON DES TROIS MODES D'ISOLATION LORS DU SECHAGE

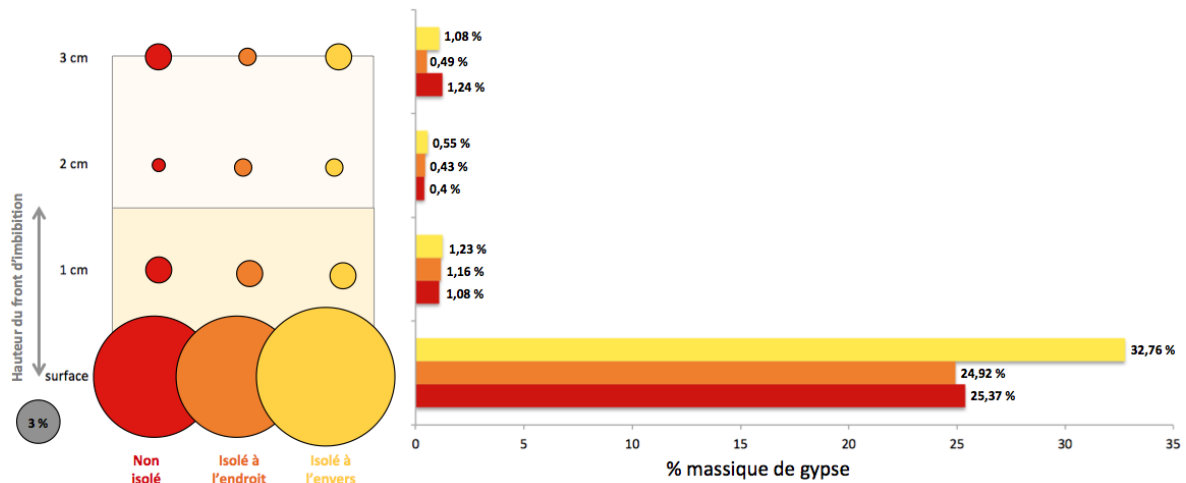


FIGURE 98 : REPRESENTATION DES TENEURS MASSIQUES DE GYPSE CONTENUES DANS LES ECHANTILLONS NON PREFISSIONS AYANT SUBI 10 CYCLES AVEC UNE SOLUTION D' H_2SO_4 ET COMPARAISON DES TROIS MODES D'ISOLATION LORS DU SECHAGE

Dans le cas des échantillons traités aux SO_2 (Figure 99), c'est encore au cœur de la pierre que les plus grandes proportions de gypse ont été mesurées, et ce quel que soit le mode de séchage. En effet, l'étude des échantillons après une seule imbibition et lyophilisation a montré que le gypse se forme au cœur de la pierre, et avec une teneur maximale de gypse dans la zone proche de la limite du front d'imbibition. A chaque cycle, la quantité de SO_2 pénétrant dans la pierre est assez constante et de l'ordre de 0,7% en masse, et conduisant donc à une augmentation de la teneur en gypse à l'intérieur de la pierre avec le nombre de cycles appliqués. Dans le cas de dix cycles d'imbibition/séchage avec injection de SO_2 , il est intéressant de remarquer que le sens imposé pour le séchage a une influence sur la répartition du gypse dans le cœur de l'éprouvette. Contrairement aux deux cas précédents, le gypse est présent dans toute la pierre avec des proportions non négligeables, et cette fois, la teneur en gypse est plus forte dans la zone où a lieu le séchage. En effet, les teneurs en gypse sont globalement uniformes dans le cas de l'échantillon non isolé avec une quantité maximale dans la zone proche du front d'imbibition. Alors que dans le cas des échantillons isolés, la teneur en gypse est systématiquement plus faible dans la zone opposée au sens du séchage. Ceci pourrait signifier que les migrations d'eau, liquide ou vapeur, durant le séchage, peuvent amener l'eau vers des zones polluées dans le SO_2 et ainsi former du gypse à ces endroits. Les zones réactives étant celles où le SO_2 est présent, ainsi que l'eau et l'air. Ceci est vérifié par le fait que la surface d'imbibition, où l'eau arrive sur un espace poreux saturé par du SO_2 gazeux, possède toujours une teneur en gypse très faible.

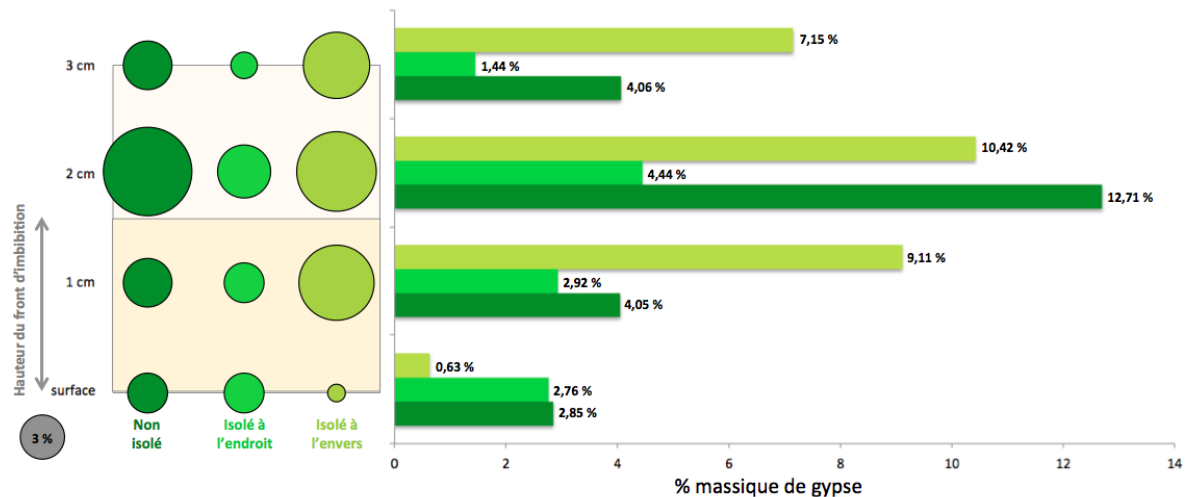


FIGURE 99 : REPRESENTATION DES TENEURS MASSIQUES DE GYPSE CONTENUES DANS LES ECHANTILLONS NON FISSURES AYANT SUBI 10 CYCLES AVEC L'INJECTION DE SO₂ ET COMPARAISON DES TROIS MODES D'ISOLATION LORS DU SECHAGE

2.2.4.2. INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE DE LA FISSURE PRE-EXISTANTE

Si le mode de séchage ne paraît pas être un paramètre majeur, les conséquences de la présence ou non d'une fissure préexistante sont plus nombreuses.

À la Figure 100 sont représentées uniquement les proportions de gypse au cœur de l'échantillon, selon le type de polluants et la morphologie des fissures. Pour rappel et vérification, les différents modes de séchage sont disposés en parallèle. Ces résultats quantitatifs seront corrélés avec les prises de masse observées dans les différents cas de figure.

Pour ne pas surcharger la représentation des données, les valeurs de gypse en surface n'ont pas été illustrées sur la figure. Mais ces valeurs sont les suivantes :

- Pour les différentes formes de séchage, les pourcentages de gypse en surface ont été illustrées à la Figure 97, la Figure 98, et la Figure 99
- Pour un même mode de séchage et un même polluant, les valeurs de gypse en surface sont comparables quel que soit le mode de fissuration

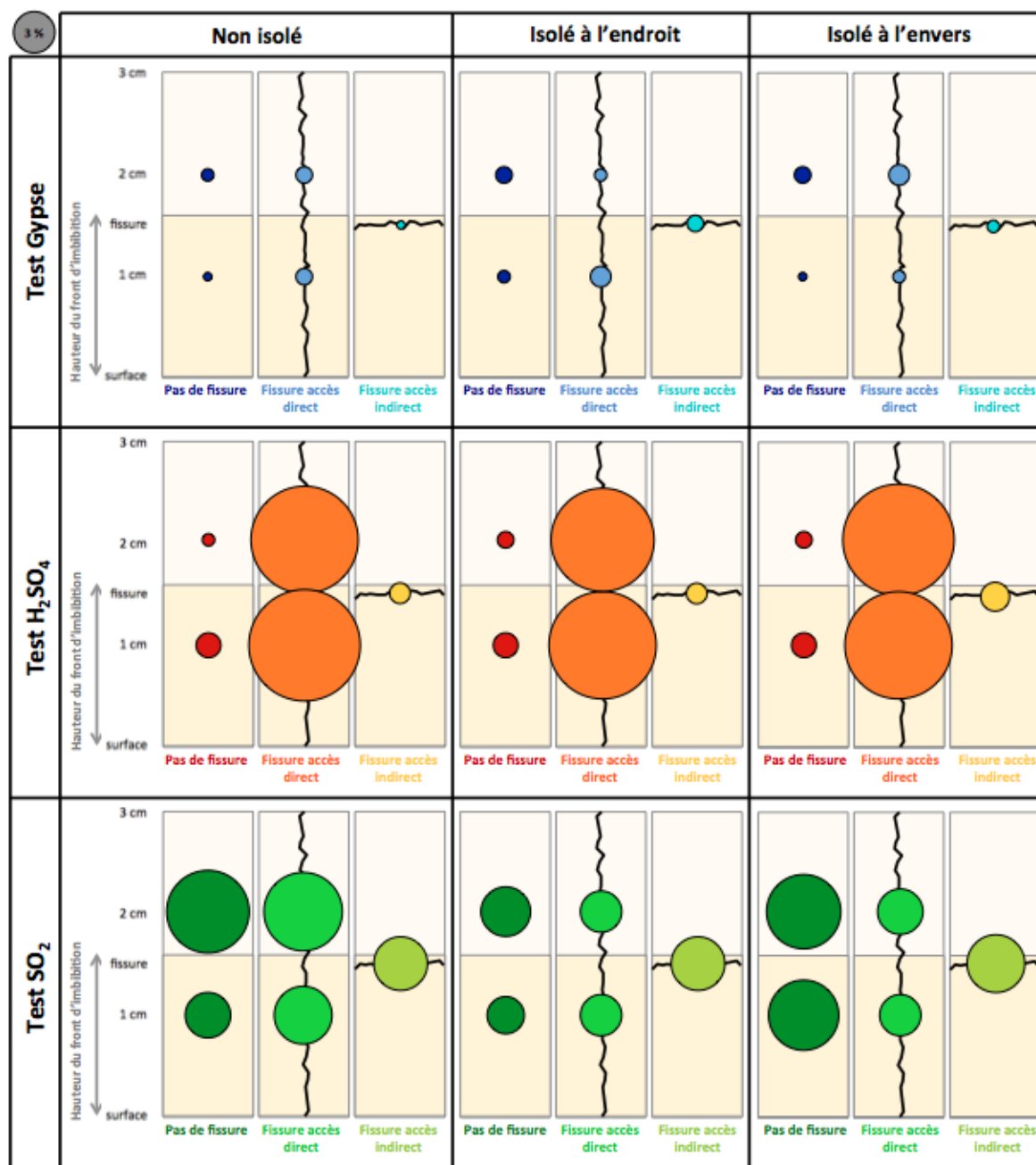


FIGURE 100 : REPRESENTATION DES TENEURS MASSIQUES DE GYPSE CONTENUES A COEUR POUR LES ECHANTILLONS AYANT SUBI 10 CYCLES AVEC DIFFERENTS POLLUANTS : INFLUENCE DE LA FISSURE

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette Figure 100, en parallèle des calculs de prise de masse :

- Pour les tests avec la solution **eau + gypse** :
 - La prise de masse des échantillons, et donc l'accumulation de gypse sont complètement indépendantes de la présence ou non de fissures, ce qui implique une accumulation exclusivement en surface,
 - Cette donnée est confirmée par les mesures quantitatives qui indiquent de faibles proportions de gypse au cœur de la pierre, inférieures à 0,5% massique.
- Pour les tests avec la solution d'**H₂SO₄** :
 - Peu importe la manière dont est isolé l'échantillon lors du séchage, c'est uniquement la fissure parallèle au sens d'imbibition (« accès direct ») qui semble avoir un rôle dans la prise de masse,
 - L'accès direct à la fissure permet l'accumulation d'une plus grande quantité de gypse (20 %) que l'autre forme de fissure ou l'échantillon non fissuré (< 2 %). Ce sens de fissuration crée un chemin préférentiel pour l'ascension capillaire où les parois de cette fissure sont exposées à la solution d'H₂SO₄ presque aussi rapidement que la surface imbibée.
- Pour les tests avec apport de **SO₂** gazeux :
 - La présence de fissures ne semble pas permettre de générer une plus grande production de gypse au niveau de la fissure, comme cela a été mis en évidence pour l'échantillon imbibé avec la solution de H₂SO₄.

2.2.5. SYNTHÈSE

Même si seulement dix cycles d'imbibition/séchage ont été réalisés, ces tests permettent de mieux cerner les paramètres qui influent sur la pénétration du gypse dans la pierre. Le Tableau 15 regroupe les résultats obtenus d'un point de vue macroscopique et microscopique sur les échantillons exposés avec chacun des trois polluants.

	Paramètres		Test gypse	Test H ₂ SO ₄	Tests SO ₂
Observations	Constats visuels		Dépôt blanc et induration sur la surface imbibée	Dépôt blanc et induration sur la surface imbibée	Aucune observation
	Temps d'imbibition au bout de 10 cycles		Moyennement modifiée : Temps multiplié par 3	Très fortement modifiée : Temps multiplié par 20	Moyennement modifiée : Temps multiplié par 2
État de la surface d'imbibition	Rugosité en comparaison d'un échantillon sain (Ra=9,08 µm)		2 fois moins : Ra=5,62 µm	Légèrement plus : Ra=10,22 µm	Légèrement plus : Ra=10,07 µm
	Teneur en gypse		3,98 % massique	25,37 % massique	2,85 % massique
	Épaisseur supposée de gypse en surface		< 0,5 mm	1 mm minimum	Non mis en évidence
Répartition du gypse en fonction des paramètres	Prise de masse moyenne après 10 cycles		1 %	6 %	3 %
	Teneur en gypse	En surface	Moyenne (3,98 %)	Très forte (25,37 %)	Moyenne (2,85 %)
		À cœur	Très faible (0,2 %)	Faible (1 %)	Forte (12,7 %)
	Influence du protocole de séchage		Pas d'influence	Pas d'influence	Peu d'influence
	Influence de la fissure		Pas d'influence	Influence de la fissure par « accès direct » uniquement	Pas d'influence

TABLEAU 15 : RECAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS APRES 10 CYCLES D'IMBIBITION/SECHAGE POUR CHACUN DES POLLUANTS APPLIQUES

Les objectifs principaux de ces tests en laboratoire ont été remplis :

- Vérifier sur le tuffeau les données décrites dans la littérature au niveau des propriétés du gypse et de ses mécanismes de formation. Les échantillons lyophilisés ont montré que le gypse se forme et s'accumule rapidement dans l'échantillon, même si les quantités mesurées sont faibles après un premier cycle. De plus, c'est bien l'accumulation de polluant qui justifie les concentrations de gypse observées. Enfin, les tests réalisés avec le principe des « marées » montrent qu'avec peu de cycles, il est très difficile de remobiliser du gypse une fois qu'il est formé.
- S'assurer qu'il était possible d'obtenir du gypse au cœur de la pierre, fait encore non avéré dans la littérature, qui s'intéresse principalement aux dépôts de surface. Tous les apports de polluants semblent permettre ce phénomène, mais dans des proportions et une cinétique variables. Le meilleur moyen permettant une présence significative de gypse en profondeur est le traitement avec du SO₂, et le moins efficace celui avec une solution eau+gypse.
- Discriminer les paramètres prépondérants, et ceux qui ne semblent pas avoir de rôle dans les mécanismes de pénétration du gypse. Par exemple, les protocoles de séchage testés restent secondaires dans la distribution du gypse formé ou accumulé dans l'échantillon.

La présence de la fissure avant l'apport de polluant et son rôle dans l'accumulation du gypse sont des paramètres dont la complexité a été abordée mais qui mériteraient une étude plus attentive. Cela pourrait apporter, notamment, un éclairage sur la caractérisation du gypse formé à cet endroit, ainsi que sur son suivi, dans le but de mettre en évidence ou non un agrandissement de cette fissure sous l'influence de l'un ou l'autre des polluants.

3. LE ROLE DU GYPSE DANS LA DESQUAMATION EN PLAQUES : UNE HYPOTHESE CREDIBLE ?

Le but de ces simulations en laboratoire était de cerner les paramètres à l'origine de la pénétration du gypse en profondeur de la pierre dans le cas des desquamations en plaques, et en surface dans le cas des desquamations en feuillets.

Afin de conclure ce diagnostic, il est important de comparer les profils de répartition du gypse observés sur des échantillons prélevés *in situ*, avec les profils de répartition du gypse obtenus sur des échantillons soumis à des cycles d'imbibition/séchage avec apport de divers polluants en soufre. Cette comparaison va permettre d'affiner les hypothèses formulées sur la provenance possible du gypse pour chacune des formes d'altération.

Les différentes hypothèses émises d'après la littérature ou formulées au cours de ce manuscrit, et qui pourraient être en lien avec la formation de la fissure, seront évaluées suivant leur réalisme dans le cas des desquamations observées au château de Chambord. L'ensemble des conclusions conduira à la proposition de scénarii supposés réalistes permettant d'expliquer le passage d'une pierre saine à une pierre desquamée.

3.1. COMPARAISON VIEILLISSEMENT NATUREL/VIEILLISSEMENT EN LABORATOIRE

3.1.1. DISCRIMINATION DE LA SOURCE DE POLLUANT EN SOUFRE

Dans le chapitre 5, les caractérisations de pierres avec desquamations en plaques prélevées sur le château de Chambord ont mis en évidence que la plaque se forme en raison d'une fissure parallèle à la surface, située à 1 cm de profondeur environ. Cette fissure est systématiquement corrélée avec la présence de gypse. La répartition du gypse en fonction de la profondeur est illustrée à la Figure 101 par l'exemple de l'échantillon B2 précédemment étudié, dont la répartition des teneurs en gypse est représentative de l'ensemble des desquamations en plaques étudiées. La teneur en gypse est faible à la surface de l'échantillon, puis à son maximum au niveau de la fissure à 1 cm, puis cette teneur diminue progressivement en fonction de la profondeur.

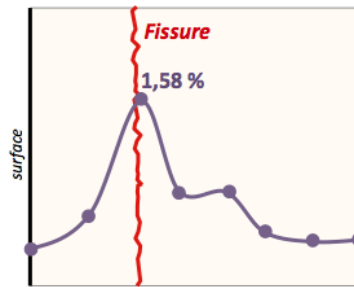


FIGURE 101 : REPARTITION DES TENEURS DE GYPSE DANS LES DESQUAMATIONS EN PLAQUES PRELEVEES SUR SITE - L'EXEMPLE DE L'ECHANTILLON B2

Le chapitre 6 s'est concentré sur la simulation expérimentale de l'altération de la pierre liée au phénomène de desquamation en plaques. Un paramètre a été choisi pour être étudié et présenté dans le cadre de cette thèse, il s'agit de la provenance et des mécanismes de pénétration du gypse au cœur de la pierre.

La Figure 102 illustre de manière synthétique et simplifiée la répartition des teneurs en gypse mesurées dans les échantillons traités selon les trois protocoles d'apports soufrés possibles : une imbibition de solution eau+gypse, une imbibition par une solution d' H_2SO_4 , et enfin une injection de SO_2 sec avant une imbibition avec de l'eau pure. Après séchage et répétition de dix cycles, on constate une répartition très différente des teneurs en gypse en fonction des protocoles appliqués, ces répartitions ayant été mises en parallèle afin de constater plus aisément les similitudes ou les différences entre les protocoles.

Dans le cas de l'apport de gypse et dans celui de l'apport d' H_2SO_4 , on remarque l'accumulation de gypse en surface, et une diminution rapide des teneurs en gypse au cœur de l'échantillon. Les proportions de gypse dans le cas du test au H_2SO_4 sont plus de cinq fois supérieures en surface à celles des tests avec la solution eau+gypse.

Dans le cas des tests effectués avec apport sec de SO_2 puis imbibition partielle avec de l'eau pure, on constate que peu de gypse est formé en surface, et que la plus grande accumulation se fait à cœur de l'échantillon. C'est donc l'apport de soufre par injection de SO_2 par voie sèche puis imbibition partielle avec de l'eau pure qui est le schéma le plus comparable à la répartition réelle du gypse dans une pierre présentant une desquamation en plaques.

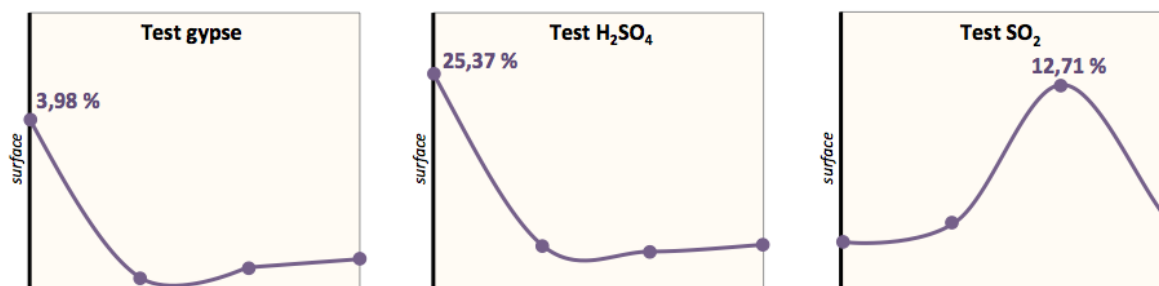


FIGURE 102 : REPARTITION RELATIVE DES TENEURS EN GYPSE DANS LES ECHANTILLONS VIEILLIS ARTIFICIELLEMENT EN LABORATOIRE, SELON LE MODE D'APPORT DE POLLUANT EN SOUFRE APRES 10 CYCLES D'IMBIBITION/SECHAGE

Même si la desquamation en feuillets n'est pas l'altération visée par les simulations expérimentales, celles-ci permettent d'apporter des renseignements supplémentaires, notamment sur la provenance du gypse. Le SO_2 atmosphérique en dépôt sec peut-être écarté des hypothèses de provenance du gypse puisque la répartition du gypse ne correspond pas à celle observée sur les desquamations en feuillets, qui présentent de fortes concentrations de gypse en surface, ainsi qu'entre les feuillets sur quelques millimètres. Les profils de teneurs en gypse obtenus sur les échantillons traités au gypse+eau et au H_2SO_4 se rapprochent plus de ceux des desquamations en feuillets. Seuls les dépôts humides en surface peuvent donc expliquer la formation de desquamations en feuillets, que le gypse soit directement apporté en surface, ou bien qu'il y soit formé par apport de H_2SO_4 , éventuellement consécutif à un apport de SO_2 en surface. En effet, si la surface de la pierre est déjà saturée en eau, le SO_2 ne pénètre pas et forme du H_2SO_4 en surface. Des tests en laboratoire ont d'ailleurs été réalisés sur des tuffeaux avec des imbibitions eau+gypse à saturation, qui ont montré, au bout d'un nombre élevé de cycles (>100), la formation de réseaux de fissures parallèles à la surface et des boursouflures dus à la cristallisation de gypse à moins de deux millimètres de la surface de la pierre, comme observé dans le cas des desquamations en feuillets (Prick, 1996 ; Pauly, 1990).

3.1.2. MÉCANISME PROBABLE DE FORMATION DU GYPSE A CŒUR PAR DÉPÔT SEC DE SO_2 ET IMBIBITION

Ces résultats montrent que la seule provenance possible qui permet une répartition du gypse similaire à celle observée dans les échantillons de pierres prélevées présentant une desquamation en plaques est l'apport de SO_2 gazeux, suivi d'une imbibition partielle. Le mécanisme possible de formation du gypse dans la pierre à partir de cette source de soufre est

illustré à la Figure 103. Ce mécanisme s'appuie sur des données de la littérature, décrites dans les chapitres 5 et 6, et sur les conclusions faites à partir des échantillons vieillis naturellement et artificiellement. Quatre étapes conduisent à la formation de gypse :

1. Le SO_2 gazeux contenu dans l'air pénètre sous forme sèche par diffusion dans la pierre.
2. Lors d'un épisode de pluie, les réactions décrites dans la littérature se produisent directement dans la pierre, à savoir la transformation du SO_2 gazeux en acide sulfurique H_2SO_4 par le contact de l'eau et de l'air, puis la réaction entre l'acide sulfurique et la calcite de la pierre qui forme du sulfate de calcium dihydraté. L'ensemble de ces réactions a lieu dans la limite de la zone imbibée lors de l'épisode de pluie, dont la profondeur moyenne est de l'ordre du centimètre.
3. En cours de séchage, un front humide se forme à une certaine profondeur de la pierre lorsque le front de séchage par diffusion de la vapeur d'eau depuis la surface s'équilibre avec le front de migration de la solution depuis la profondeur vers la surface. C'est dans cette zone que l'eau liquide et les sels solubles s'accumulent, autrement dit le gypse en solution nouvellement formé.
4. Au fur et à mesure que l'humidité relative de cette zone d'équilibre hydrique diminue, le gypse présent en solution cristallise à cette profondeur de la pierre.

Une nuance peut toutefois être apportée à ce mécanisme. Les tests en laboratoire ont montré que si le front d'imbibition s'arrête à 1,5 cm, en revanche, la frange capillaire va jusqu'à 2 cm, et l'on trouve même du gypse à 3 cm, là où *a priori* il n'y a pas d'eau liquide. Ces mêmes constatations sont faites sur les échantillons prélevés sur le château, qui contiennent du gypse à des profondeurs au-delà de la zone d'imbibition capillaire. Ce constat montre que l'eau sous forme de vapeur et les phénomènes de condensation capillaire sont suffisants pour permettre la formation de gypse.

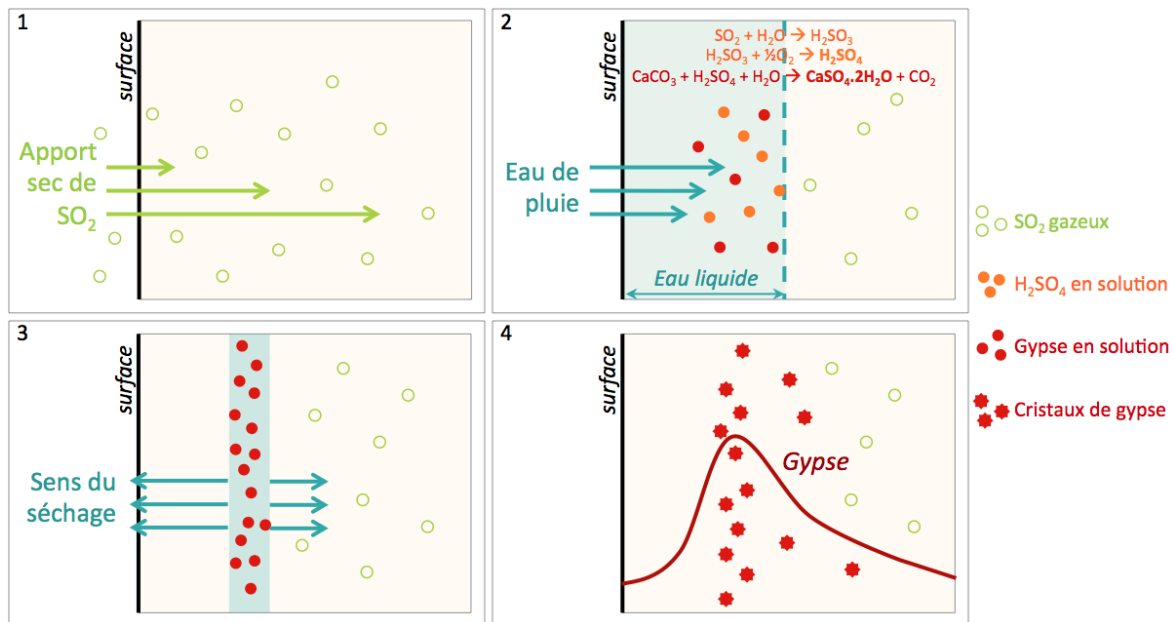


FIGURE 103 : MECANISME DE FORMATION DU GYPSE DANS LA PIERRE A PARTIR D'UN APPORT SEC DE SO_2 GAZEUX

Dans le cas des deux autres protocoles, le gypse est principalement formé en surface, mais ne semble pas pouvoir migrer beaucoup plus en profondeur. Dans la mesure où la mobilisation du gypse depuis la surface vers la profondeur n'a pas été mise en évidence par cette étude au bout de dix cycles, ni par ceux décrits dans la littérature, le mécanisme décrit ici à partir d'apport de SO_2 en dépôt sec semble le plus probable pour expliquer la répartition du gypse dans les desquamations en plaques observées sur le château de Chambord. Il faut toutefois rester prudent face à cette conclusion, dans la mesure où le nombre de cycles réalisés est faible, et où les tests de SO_2 gazeux ont été faites dans des conditions extrêmes, à saturation complète.

3.2. PROPOSITION DE MECANISMES DE FORMATION DE LA PLAQUE

3.2.1. ÉVALUATION DES HYPOTHÈSES DE FORMATION DE LA FISSURE

Ce chapitre a permis d'élucider la provenance la plus probable du gypse observé dans les desquamations en plaques du château de Chambord, accusant la présence de SO_2 gazeux présent dans l'air. Il a également permis d'identifier le mécanisme de pénétration du polluant et la formation du gypse directement à l'intérieur dans la pierre.

Ces éléments, relatifs au gypse, sont une des étapes du processus qui mène à la formation d'une fissure avec du gypse, et donc d'une desquamation en plaques. Les facteurs à l'origine de la fissure elle-même constituent le deuxième point qu'il faut élucider.

Dans ce travail, la formation de la fissure dans la plaque n'est pas un élément qui a spécifiquement été étudié. En revanche, la confrontation des données de la littérature avec les caractérisations d'altérations effectuées permet d'éliminer certaines hypothèses :

- **Le rôle des modifications texturales de surface** dues à la dissolution et recristallisation de la calcite et d'autres sels, entraînant une modification des flux hydriques dans la pierre est une hypothèse qui est pour le moment mise de côté. En effet, même si elle est formulée pour expliquer les mécanismes de formation de la plaque, elle ne semble pas réaliste du point de vue de la simulation expérimentale. Les tests ont généralement montré que ces phénomènes de dissolution / recristallisation de la calcite ont lieu en surface, mais sur des épaisseurs de l'ordre du millimètre plutôt que du centimètre. De plus, ce mécanisme suggère que les sels éventuellement présents dans les solutions cristallisent dans la porosité à la surface, ce qui va à l'encontre des caractérisations effectuées sur les pierres desquamées du château.
- **Le rôle du gel** a été écarté des facteurs probables à l'origine de la fissure. En effet, on ne peut pas être certain que les changements de température mesurés sur le site de Chambord et dans la pierre sont suffisants pour créer des phénomènes de fatigue liés au gel. En revanche, des pics isolés de baisse de température ont parfois été observés, et s'ils suivent un épisode de pluie important, une influence ponctuelle de ce phénomène n'est pas écartée et peut être considérée comme un facteur aggravant de la propagation de la fissure ou à l'origine de la chute de la plaque.
- **Le rôle du gypse** comme seul facteur déclencheur de la formation de la fissure n'est pas non plus une hypothèse retenue à l'issue des simulations expérimentales réalisées, puisqu'elle n'a pas été observée même pour des teneurs en gypse assez élevées (12% à cœur dans le cas du SO_2). De plus, les pressions de cristallisation exercées par le gypse sur les parois de la pierre sont parfois jugées insuffisantes par les auteurs. Mais ceci est à relativiser étant donné le nombre limité de dix cycles réalisés dans cette étude. L'hypothèse d'un phénomène aggravant de la fissure est

également un point sur lequel on ne peut pas se prononcer à l'issue des tests. En revanche, les tests et les caractérisations montrent qu'il n'y a pas besoin d'une fissure préexistante pour que le gypse cristallise plus fortement dans la zone de la fissure, ce qui permet de penser que le gypse peut tout de même avoir un rôle, même indirect, dans le processus de desquamation en plaques.

- Enfin, une dernière hypothèse formulée dans la littérature a été présentée dans le chapitre précédent. Les fissures seraient dues à des phénomènes de fatigue liés à des **dilatations thermo-hydriques** différentielles entre la surface de la pierre imbibée lors d'un épisode de pluie, et l'intérieur de la pierre, sec. Ce phénomène serait accentué dans le cas de pierres possédant des minéraux argileux. Bien que cet aspect n'ait pas du tout été étudié, ni par la caractérisation, ni par l'expérimentation, aucune observation ni aucune conclusion faites dans cette étude ne semblent aller à l'encontre de cette hypothèse, selon laquelle les dilatations thermo-hydriques seraient à l'origine de la formation de la fissure.

3.2.2. LES SCENARIIS POSSIBLES

L'établissement d'un diagnostic d'altération passe par la proposition de mécanismes et de scénarii possibles de formation de l'altération par desquamation en plaques. La Figure 104 illustre de manière chronologique les différentes étapes de formation de la plaque, depuis une pierre saine jusqu'à une pierre entièrement desquamée et même repatinée. Entre ces différentes étapes s'insèrent les facteurs d'altération qui peuvent intervenir.

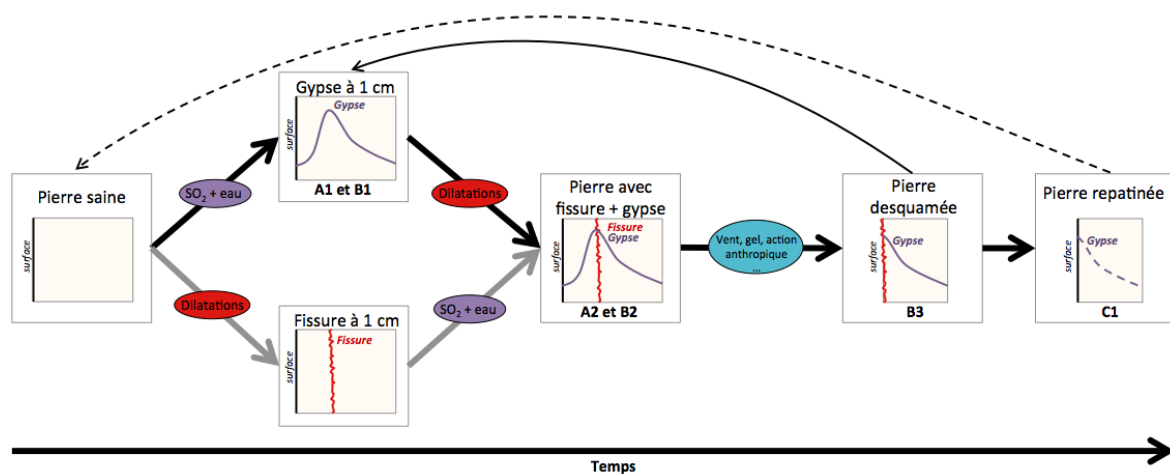


FIGURE 104 : SCHEMA RECAPITULATIF DES DIFFERENTES ETAPES DE FORMATION DE LA PLAQUE

Deux facteurs d'altération principaux ont été retenus :

- L'un à l'origine de la présence de gypse, et éventuellement à l'origine de la fissure : l'apport de SO_2 atmosphérique sous forme de dépôt sec dans la pierre, entraînant la cristallisation du gypse directement dans la pierre, après imbibition d'eau, au moment du séchage.
- L'autre à l'origine de la fissure uniquement : la fatigue par dilatations thermo-hydriques.

Lorsque l'on passe d'une pierre saine à une pierre en cours de desquamation, deux phénomènes sont observés : la formation de la fissure à 1 cm de profondeur, et l'accumulation de gypse au même endroit. La question se pose alors de l'antériorité d'un phénomène par rapport à l'autre. Le gypse s'est-il accumulé avant la formation de la fissure, ou bien s'est-il localisé à cet endroit après la formation de la fissure ? Dans le cas des plaques observées à Chambord, il y a systématiquement du gypse au niveau de la fissure. De plus, on observe la présence de gypse à 1 cm de profondeur dans des pierres non encore desquamées comme cela a été montré pour les échantillons prélevés notés A1 et B1 (voir chapitre 5). Ces deux arguments conduisent à sélectionner le premier des deux mécanismes comme étant le plus probable. L'accumulation de gypse à un endroit de la pierre conduirait à une modification locale de sa structure et de ses propriétés, accentuant les dilatations thermo-hydriques différentielles. Afin de vérifier cette hypothèse et notamment la relation de cause à effet entre les deux phénomènes, il serait intéressant de mener d'autres tests de simulation expérimentale en faisant par exemple subir des cycles de dilatations thermo-hydriques à des échantillons contenant préalablement du gypse localisé au cœur de la pierre grâce à l'apport de SO_2 gazeux. Seul un nombre important de cycles pourra conduire à des conclusions plus précises quant aux mécanismes en jeu et aux paramètres influents.

En ce qui concerne les éléments qui sont à l'origine de la chute de la plaque une fois la fissure formée, ils ont déjà été évoqués au cours des chapitres précédents, il s'agit éventuellement des phénomènes de gel/dégel, de l'action du vent, d'une action anthropique comme une perturbation du parement réaménagé ou simplement vandalisé.

Enfin, une fois que la pierre est desquamée, on observe que d'autres fissures se créent et que le phénomène de desquamation peut recommencer. De même, dans certains cas (comme pour l'échantillon C1 prélevé), une patine de surface peut se reformer sur la surface d'une

Pierre desquamée ne contenant alors presque plus de gypse, et l'on observe une progressive redistribution du gypse avec un pic à 1 cm de profondeur.

La Figure 104 présente le schéma d'évolution de la plaque sur une échelle de temps. Il est toutefois difficile d'associer une date, ou même une durée à ces différents phénomènes.

Les dilatations thermo-hydriques sont des phénomènes naturels, qui ont pu agir sur la pierre dès sa pose en parement au XVI^e siècle. De même, l'étude de la pollution ancienne montre qu'en milieu urbain, le soufre comme polluant anthropique est présent dans l'atmosphère dès le XVI^e siècle. Il n'est pas possible de savoir depuis quand le château a subi une atmosphère polluée. Peut-être est-ce un phénomène aussi ancien que la construction du château, peut-être est-ce un phénomène plus récent. Dans ce deuxième cas, on peut imaginer que l'environnement rural du domaine a contribué à limiter fortement l'apport de polluants soufrés provenant des centres urbains environnants, et que ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle, lorsque ces pollutions ont connu un pic, que le château en a subi les effets.

À l'inverse, toujours sur la base d'hypothèses, on peut se demander si la diminution de la pollution atmosphérique de ces dernières années n'aura pas une conséquence positive sur le développement de ces altérations. En effet, les pierres ayant déjà accumulé du gypse en accumuleront peut-être de moins en moins, et si les conséquences de l'altération sont liées à un seuil, peut-être que ce seuil ne sera pas dépassé. De même, si le niveau de SO₂ dans l'atmosphère demeure toujours aussi bas dans les décennies à venir, on peut espérer que les pierres les plus récemment posées ne contiendront jamais autant de gypse que les plus anciennes.

Cependant, les sulfates présents dans la pierre depuis plusieurs dizaines d'années pourraient contribuer à causer des dommages même si les sources de pollution sont éliminées. Il s'agirait alors d'une remobilisation du gypse conduisant à une concentration locale supérieure (Smith et Prikryl, 2007). Même si ce fait est souvent évoqué, il n'a jamais été démontré (Vleugels *et al.*, 1993).

4. CONCLUSION

À l'issu des caractérisations des desquamations en plaques du château de Chambord, un phénomène a été mis en évidence : la présence de gypse dans la pierre, localisée au niveau de la fissure à l'origine du détachement de la plaque. En revanche, la provenance du gypse n'a pas pu être identifiée par le seul biais de la caractérisation. Ce dernier chapitre proposait l'exploration des mécanismes gravitant autour de la formation de gypse et de sa localisation à cette profondeur.

En fonction des différentes provenances évoquées dans le chapitre précédent et des données de la littérature, les mécanismes de formation du gypse ont été décrits. De même, les propriétés connues de ce minéral ont été exposées. Ces propriétés et ces mécanismes ont été vérifiés par la réalisation de tests simples, qui ont permis de s'assurer qu'ils s'appliquaient bien au matériau étudié, le tuffeau.

Ainsi, les trois provenances possibles du gypse ont été testées en exploitant le principe de la réalisation de cycles d'imbibition partielle/séchage : du gypse en solution, une solution d'acide sulfurique, un apport de dioxyde de soufre gazeux dans la pierre avant une imbibition capillaire à l'eau pure. Dans tous les cas, du gypse est formé ou déposé, en surface de la pierre uniquement.

Afin de cerner les différents paramètres permettant l'accumulation de gypse en profondeur de la pierre, des protocoles plus systématiques ont été établis, faisant varier le type de polluant et son mode de pénétration, le protocole de séchage employé, et encore la préparation initiale de l'échantillon, pré-fissuré ou non.

Les résultats des tests ont montré que c'est dans le cas des imbibitions à l'acide sulfurique que le maximum de gypse est formé, mais principalement en surface. Les solutions eau+gypse présentent le même profil de répartition du gypse, dans de bien moins grandes proportions. Enfin, seule l'injection de SO_2 gazeux dans la pierre suivie d'une imbibition partielle a permis la formation de gypse, en quantités significatives, préférentiellement à cœur des échantillons. Quel que soit le protocole de séchage ou de pré-fissuration employé, l'influence de ces paramètres ne semble pas prépondérante, mais ceci n'a pas pu être estimé avec certitude en raison du faible nombre de cycles appliqué.

Enfin, si l'on compare les profils de concentration en gypse des échantillons vieilliss artificiellement à ceux qui ont vieilli naturellement, on s'aperçoit que seule la répétition de cycles d'injection de dioxyde de soufre en dépôt sec suivie d'une imbibition partielle peut être responsable de la distribution en gypse symptomatique des desquamations en plaques. Une des questions posées à l'issue du chapitre 5 a pu être résolue, à savoir la provenance du gypse identifié dans les desquamations en plaques. En revanche, d'autres questions demeurent en suspens, notamment les mécanismes à l'origine de la formation de la fissure et le rôle du gypse par rapport à cette fissure. Certaines hypothèses évoquées dans la littérature pour expliquer la formation de la plaque ont pu être écartées, et ne demeurent que le rôle du gypse et celui des dilatations thermo-hydriques. Les différentes relations qui peuvent les unir, dans un schéma linéaire ou au contraire en parallèle, ont été évoquées, afin d'ouvrir la discussion et d'évoquer les évolutions possibles de cette forme d'altération.

CHAPITRE 7

PERSPECTIVES : VERS L'ETABLISSEMENT D'UN CARNET DE SANTE NUMERIQUE

Le résultat de la méthodologie présentée au chapitre 1 est une cartographie 2D, accueillant une représentation graphique des données collectées. Mais cette représentation est partielle, puisque seules les informations cartographiables sont représentées, et l'étude et le croisement des données sont fastidieux. Il a donc fallu réfléchir à un moyen de centraliser et de stocker toutes ces données hétérogènes (archives historiques, photographies, relevés d'altérations, rapports de restauration, ...), et de les rendre accessibles aux acteurs de la conservation concernés. Il a donc paru essentiel d'associer une base de données aux cartographies de représentation.

NUBES est une plateforme opensource en ligne, et un système d'information à l'échelle de l'architecture pour la description, l'analyse, la documentation et le partage des représentations numériques du patrimoine culturel (De Luca *et al.*, 2011). Cet outil a été développé par le laboratoire MAP-Gamsau (Modèle et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, UMR 3495), puis a été adapté par celui-ci pour répondre aux besoins de cette étude (Stefani *et al.*, 2012). NUBES permet de stocker tous types de documents et de les rattacher aux différentes parties d'un édifice. Il permet également de représenter graphiquement les données collectées et de les analyser.

La particularité de cet outil est qu'il repose sur la représentation en trois dimensions de cet édifice. Il va donc falloir réaliser un modèle 3D des parties du château étudiées. Mais une des contraintes imposées par NUBES, est qu'il faut un modèle 3D sur lequel il est possible de dessiner afin de réaliser les cartographies, et que ce modèle doit être découpé en entités architecturales. Les différentes étapes de ce travail et les choix techniques effectués seront illustrés avec la tour du Chaudron.

1. RÉALISATION DU SUPPORT 3D

Dans le domaine de la conservation ou de la valorisation du patrimoine architectural, de nombreuses techniques d'acquisition de modèles numériques en trois dimensions ont été développés. Citons par exemple la lasergrammétrie qui est l'acquisition d'un modèle 3D par relevé scanner laser, ou bien la photogrammétrie, qui permet par exemple de générer un nuage de points à partir de photographies. Ces techniques sont souvent comparées, voire combinées, chacune présentant des avantages : le choix de l'une ou l'autre dépend de l'utilisation que l'on fait du modèle par la suite (Brunetaud *et al.*, 2012b ; Al-kheder *et al.*, 2009 ; Lambers, 2007).

Certaines techniques de réalisation d'une orthophotographie par le biais ou non de modèles 3D ont été présentées précédemment. Dans le but d'améliorer la méthodologie de représentation du monument, plusieurs méthodes de reconstruction 3D ont été explorées durant ce travail de thèse (Brunetaud *et al.*, 2012a, Brunetaud *et al.*, 2012b).

1.1. LA PHOTOMODÉLISATION

Après l'acquisition de points géo-référencés grâce à un tachéomètre, des photographies sont prises de manière régulière tout autour de la tour, avec un recouvrement important des surfaces photographiées. Le logiciel ImageModeler2009 est utilisé pour orienter les photographies les unes par rapport aux autres et générer des coordonnées de points caractéristiques. Les volumes du bâtiment sont ensuite définis par la création de formes géométriques appuyées sur ces points. Les textures tirées des photographies orientées sont appliquées sur les surfaces de ces objets. Enfin, l'édifice ainsi recréé est découpé en entités architecturales cohérentes telles que les fenêtres, les travées, les pilastres, les chapiteaux, etc (Figure 105).

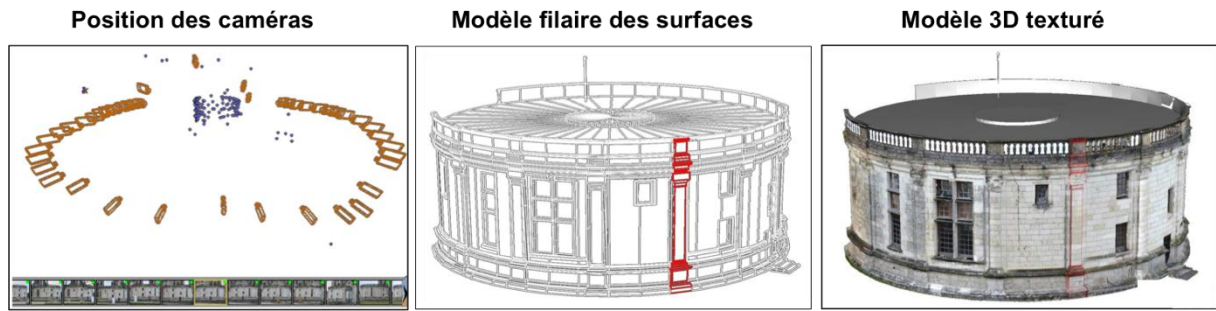


FIGURE 105 : MODELE 3D DE LA TOUR DU CHAUDRON REALISE PAR PHOTOMODELISATION

La texture des objets en 3D est ensuite dépliée de manière à disposer d'un support 2D indispensable pour la réalisation des cartographies dans NUBES (Figure 106). Le résultat obtenu est un modèle 3D d'une précision de l'ordre du centimètre.

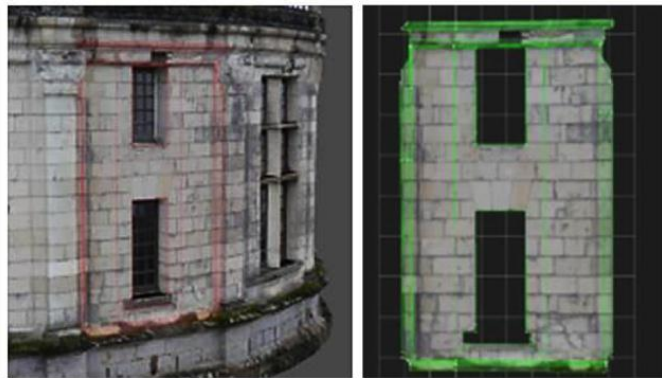


FIGURE 106 : SELECTION D'UNE ENTITE DU MODELE 3D, DEPLIEE EN 2D

1.2. LA LASERGRAMMÉTRIE

Des relevés 3D ont également été effectués pour l'ensemble des façades extérieures du château avec un scanner laser Faro Focus 3D intégrant un appareil photographique numérique fish-eye. Le scanner laser permet d'obtenir un nuage de point plus ou moins dense. La portée du scanner étant limitée de quelques mètres à quelques dizaines de mètres selon la résolution qu'on lui impose, il est donc nécessaire d'effectuer plusieurs stations pour obtenir une façade complète. Les différents nuages de points obtenus sont ensuite recalés entre eux et assemblés. Chaque nuage de points est maillé pour obtenir des surfaces orientées. Enfin, les différents maillages sont fusionnés pour n'obtenir plus qu'un seul modèle. Mais si un relevé scanner permet d'obtenir un modèle 3D juste et esthétique, dont la résolution est de l'ordre du millimètre, le résultat est un fichier lourd, qui ne peut servir de support aux

données collectées, puisqu'en raison de sa complexité, aucune surface n'est déplaçable en 2D pour permettre le dessin des cartographies.



FIGURE 107 : MODELE 3D DE LA TOUR DU CHAUDRON REALISE PAR LASERGRAMMETRIE

Cette technique a surtout été utilisée pour modéliser avec précision certains éléments architecturaux particuliers, comme les chapiteaux, ou alors des zones d'altération. Ces modèles servent de représentation d'un état qui sera archivé et conservé, et qui peut même être associé au modèle 3D acquis par photomodélisation (Figure 108). Cette technique est donc complémentaire de la photomodélisation, qui pour l'instant est la seule à répondre aux besoins imposés par NUBES.



FIGURE 108 : COMBINAISON DES DEUX METHODES DE MODELISATION 3D POUR AMELIORER L'ETUDE ET L'ANALYSE

À l'inverse, le château ayant entièrement été modélisé par scanner laser, le modèle obtenu peut servir de support à l'intégration des parties étudiées plus précisément, qui elles, ont été acquises par photomodélisation et cartographiées. L'objectif est cette fois de valoriser auprès du grand public le travail de recherche effectué, en situant les parties étudiées dans leur contexte architectural (Figure 109).

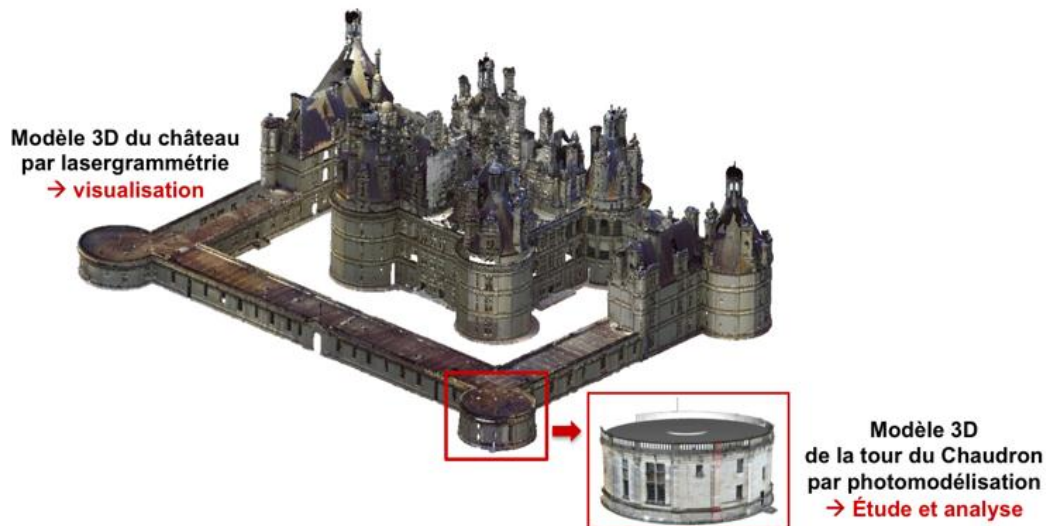


FIGURE 109 : COMBINAISON DES DEUX METHODES DE MODELISATION 3D A DES FINS DE VALORISATION DU TRAVAIL SCIENTIFIQUE

2. ORGANISATION ET GESTION DES DONNÉES : NUBES

2.1. PRÉSENTATION DE L'OUTIL

La plate-forme NUBES est un système d'information reposant sur une base de données dans laquelle s'insèrent des représentations architecturales 3D. Cette interface a trois fonctions principales :

- Le stockage de données hétérogènes
- La manipulation de représentations géométriques tridimensionnelles en temps réel
- La consultation et la gestion des données en ligne

NUBES a été adapté pour répondre aux besoins de cette étude, dont le cahier des charges spécifiait un certain nombre d'exigences. Le processus de renseignement de NUBES avec les données collectées se déroule en plusieurs étapes :

- **L'affichage dynamique de chaque élément 3D du modèle.** Le modèle 3D est composé de différentes entités architecturales, dont les coordonnées sont enregistrées dans la base de données et auxquelles correspond un aspect visuel (dans le cas de la tour du Chaudron une surface texturée), qui peut être affichée en différentes qualités.

- **Le dessin des cartographies de pierre sur les textures 2D et leur affichage sur le modèle 3D.** Un éditeur de dessin vectoriel a été adapté et intégré à la plate-forme NUBES afin de dessiner/modifier les cartographies à l'aide de calques hiérarchisés, sur le même modèle que celui établi pour les cartographies en 2D décrites plus haut dans ce chapitre. Le dessin des pierres ou des altérations est réalisé sur les textures dépliées en 2D de chaque entité du modèle 3D. Les cartographies sont ensuite enregistrées dans la base de données et reprojetées sur le modèle 3D.
- **L'affichage croisé des cartographies en temps réel dans la scène 3D.** La scène 3D constitue le cadre privilégié pour consulter les cartographies, en sélectionnant les calques à afficher simultanément. Un outil d'analyse statistique des cartographies permettant le calcul de surfaces est associé à l'interface de navigation et d'affichage 3D.
- **L'archivage de données.** Des points spécifiques peuvent être indiqués sur le modèle 3D, auxquels correspondent des fichiers enregistrés dans la base de données, de formats et de types aussi variés que des photographies de détails, des rapports de restauration ou d'intervention, des textes anciens, des plans, des nuages de points de zones précises, etc. Il est également possible de localiser sur le modèle 3D les prélèvements réalisés, par l'intermédiaire de ces points spécifiques auxquels peuvent être associés des descriptions, des rapports de prélèvements ou d'analyse, etc. Ces éléments peuvent se rapporter à l'ensemble du modèle 3D, à une des entités du modèle, ou encore à un point particulier de l'entité, et leur consultation se fait directement en ligne.

Enfin, la Figure 110 présente l'interface utilisateur de NUBES, qui est divisée en trois parties :

- L'interface d'implémentation des données, de navigation dans la base de données, et d'affichage des données
- L'interface de navigation dans la scène 3D
- L'interface de dessin vectoriel

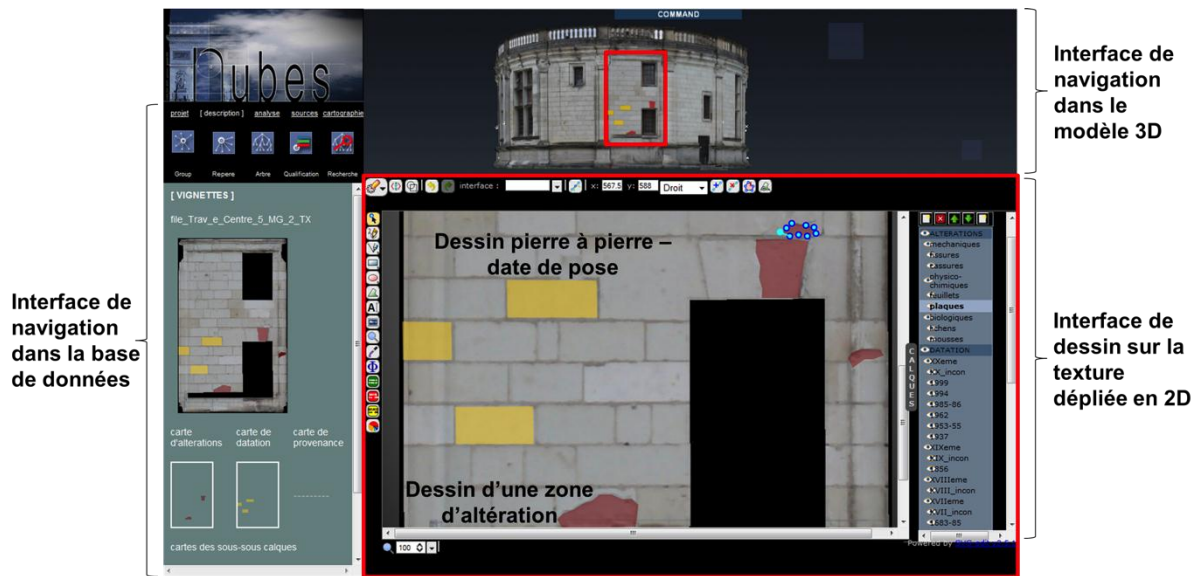


FIGURE 110 : PRESENTATION DE L'INTERFACE DE NUBES

2.2. CHOIX TECHNIQUES

C'est le laboratoire MAP-GAMSAU qui a adapté son propre outil aux besoins qui ont été définis. En dehors des aspects de programmation informatique (Stefani *et al.*, 2012), ces améliorations techniques ont été envisagées et conçues au cours de ce travail de thèse. L'élaboration de la hiérarchie de calque a été faite à la suite de l'étude des archives, et le renseignement de la base de données, commencé durant cette thèse, est toujours en cours.

Par rapport aux dessins réalisés pour les cartographies en 2D, décrites plus haut dans ce chapitre, et qui seront présentées dans les chapitres suivants, des améliorations techniques ont été envisagées pour les cartographies de NUBES.

Outre le fait que l'on dispose d'un modèle 3D permettant d'afficher toutes les facettes et reliefs de l'édifice, y compris ceux qui sont masqués ou absents d'une représentation 2D, la structure même des calques prévoit quelques améliorations :

- Sur les représentations en 2D, le dessin des pierres est relativement simple, une pierre étant souvent représentée par un quadrilatère, ce dessin concernant parfois des ensembles de pierres lorsque celles-ci ont les mêmes caractéristiques. Dans NUBES, le choix a été fait d'affiner cette représentation des données par un dessin pierre à pierre systématique. Le résultat est un polygone complexe. Le calque concerné est appelé matrice, il contient le dessin de chacune des pierres de l'entité dépliée en 2D.

Cette matrice est ensuite reproduite dans les calques de datation et de provenance des pierres, et à chaque pierre est attribuée la couleur et le sous-calque correspondant à ses caractéristiques. Ce système de représentation du calque de base, illustré à la Figure 111, a pour intérêt principal de différencier les surfaces des pierres de celles des mortiers de rejointoiement, permettant de rendre plus justes les calculs statistiques, et d'apporter de nouvelles informations pouvant intéresser les historiens et archéologues du bâti : le dénombrement des pierres ou la morphologie d'application des mortiers (très droits, ou au contraire, beurrés).

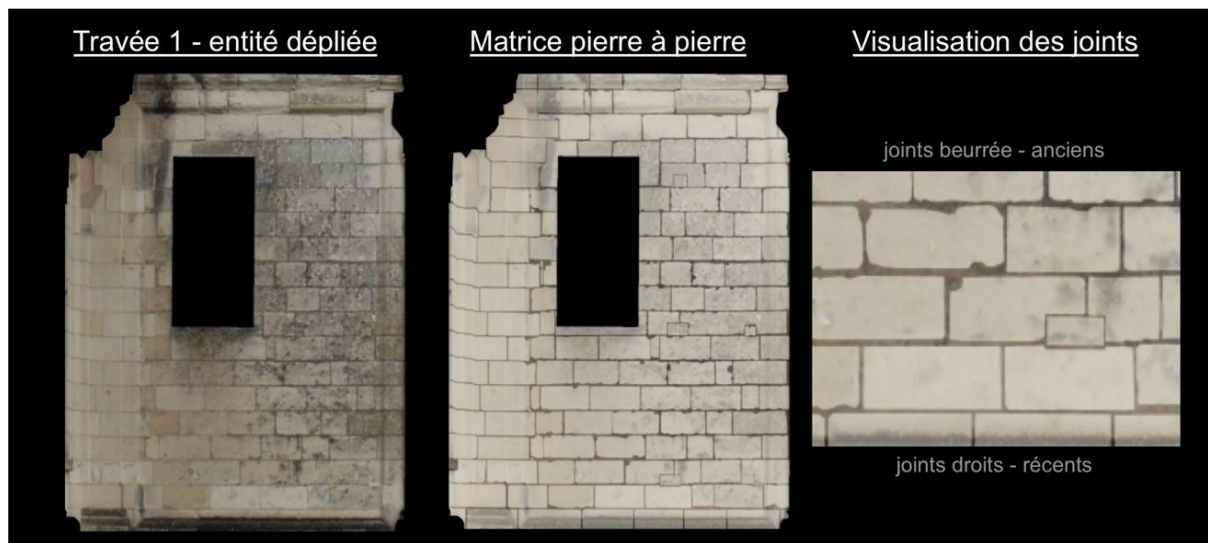


FIGURE 111 : CALQUE DE BASE – LA MATRICE

- Il existe trois catégories de calques correspondant aux résultats des datations de pierres, des identifications de provenance de ces pierres, et enfin, aux relevés des différentes altérations de ces pierres (Figure 112). Cependant, les calculs statistiques des pourcentages recherchés ne sont pas effectués de la même manière que ceux des cartographies 2D : ce n'est plus le nombre de pixels de chaque surface colorée qui est comptabilisé manuellement, c'est directement l'aire de la surface dessinée qui est calculée automatiquement. Ce chiffre est rapporté à l'aire de la surface totale de l'entité dépliée, qui est un calque à part entière.



FIGURE 112 : CALQUES DE REPRESENTATION DES DONNEES

Un des avantages de l'utilisation de la plateforme NUBES, serait de simuler l'évolution des altérations. En effet, dans les cartographies, le contour des altérations est reproduit en dessin vectoriel. La forme obtenue peut être transformée comme on le souhaite, et une possibilité a été imaginée d'appliquer à cette forme des transformations automatiques qui répondraient à un certain nombre de critères définis grâce aux observations. Il serait possible d'augmenter la surface altérée, tout en limitant ou ralentissant le développement lorsque la forme touche un joint de mortier, ou bien une pierre d'une autre nature. Le dessin pierre à pierre délimitant ainsi la position des mortiers est un élément primordial pour illustrer cette évolution. Reste à intégrer à ces schémas évolutifs une notion temporelle, qui pour l'instant est encore difficile à définir (Stefani *et al.*, 2012).

3. APPORT DE CETTE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE

Les résultats sont présentés sur un modèle 3D, certes plus complet et plus juste qu'une simple représentation 2D puisqu'il n'y a pas de reliefs et de surfaces masqués, mais la précision relative du modèle (de l'ordre du centimètre), ne rend pas les calculs statistiques extrêmement justes pour autant. Ce point doit être amélioré avec l'élaboration de modèles 3D plus précis, réalisés à partir des modèles obtenus par scanner laser.

Mais il existe cependant de nombreux avantages à l'utilisation de cette nouvelle méthodologie, par rapport à une méthodologie plus classique de représentation et traitement des données sur un modèle en deux dimensions (Tableau 16).

	Cartographie 2D	Modèle 3D et NUBES
Dessin	Un ensemble de pierres (surface pierre + mortier)	Pierre à pierre pour former une matrice : → dénombrement possible des pierres → accès à des informations sur les mortiers
Visibilité des zones	Certaines zones cachées : → reliefs latéraux, supérieurs ou inférieurs cachés → zones de façades masquées par des obstacles	Aucune zone cachée : → visualisation de toutes les surfaces accessibles à l'appareil photo (côté des pilastres avec les fissures, parties supérieures et inférieures du stylobate) → contournement des obstacles
Statistiques	Estimations : → surfaces non réalistes → calcul du nombre de pixels colorés : imprécisions	Réalité : → surfaces plus réalistes → calcul de l'aire du polygone : plus juste
Croisement des données	Manuel	Automatisé
Diffusion des données	Limitée et figée	Instantanée et évolutive

TABLEAU 16 : AVANTAGES DE L'UTILISATION DE NUBES ET D'UN MODELE 3D PAR RAPPORT A DES CARTOGRAPHIES 2D

L'utilisation de la plateforme NUBES, une fois adaptée aux besoins, représente un carnet de santé entièrement numérique, toutes les données étant informatisées, avec deux avantages principaux parmi les plus pertinents :

- NUBES permet la mutualisation des données via une interface en ligne : ce travail peut ainsi être mis à disposition des acteurs du patrimoine et des gens concernés par l'histoire et l'état de santé du château de Chambord.
- NUBES est avant tout un système associé à une base de données dynamique et donc évolutive : les données peuvent être actualisées et augmentées, elles ne sont pas figées sur un support (comme un rapport écrit ou une base de données sur CD-Rom).

Dans cette étude, NUBES est essentiellement un outil de travail et de stockage, qui n'exclue pas la première méthodologie employée dans ce manuscrit :

- L'archivage et le stockage des données, point défaillant de la première méthodologie présentée, et point essentiel du carnet de santé, n'était pas nécessaire dans la présentation des résultats dans ce manuscrit.
- Le système de représentation en 2D, bien qu'incomplet, se prête aussi bien à l'illustration des données présentées dans ce travail de thèse par le biais de ce manuscrit.

Dans l'état actuel des choses, le modèle de la tour du Chaudron est construit et enregistré, entité par entité, dans NUBES. Le dessin des cartographies et l'enregistrement des données associées et archivées sont en cours d'implémentation. Il reste à terminer le modèle 3D de l'aile Sud, à l'enregistrer dans NUBES et à lui associer toutes les données qui lui sont liées.

4. CONCLUSION

La méthodologie mise en place pour étudier les façades, et qui a été exposée dans les trois premiers chapitres, présente des limites, car les résultats sont des cartographies 2D qui permettent de représenter uniquement les informations cartographiables. De plus, le croisement des données est fastidieux. C'est la raison pour laquelle, le développement d'un carnet de santé numérique a été engagé. L'association dans ce carnet du modèle 3D à une base de données apporte également de nombreux avantages, comme ceux de permettre de stocker des types de données hétérogènes, de les centraliser et de les diffuser.

La contribution apportée ne s'est pas limitée à une participation active dans la réalisation du modèle 3D des deux parties étudiées et du château dans sa globalité mais également aux définitions des concepts techniques utilisés dans l'élaboration de ce carnet de santé. L'expérience accumulée dans l'établissement du carnet de santé était un atout pour l'élaboration du carnet numérique et la hiérarchie de calques faite à la suite de l'étude des archives en est l'exemple type.

Il est à noter que le renseignement de la base de données, commencé durant cette thèse, est toujours en cours et nécessite encore plusieurs mois de travail car le choix qui a été retenu est de renseigner pratiquement les informations à l'échelle de la pierre, méthodologie plus précise, donc plus longue.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La notion de carnet de santé de monument, par analogie avec le domaine médical, est associée au fait de consigner toutes les connaissances sur le passé, le présent et l'avenir d'un monument, afin de proposer les solutions de conservation/restauration les plus adaptées. Il s'agit donc un outil d'aide à la décision à destination des architectes et des maîtres d'ouvrages.

Cette thèse s'insère dans le projet SACRE¹²⁷, avec pour ambition de concevoir et de traiter le carnet de santé d'un monument, ainsi que de réaliser une simulation expérimentale pour mieux comprendre son vieillissement.

Ce carnet de santé doit référencer toutes les informations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic détaillé de l'état d'altération de l'ouvrage, de la localisation des dégradations aux conditions météorologiques, en passant par les archives historiques et architecturales, de manière à rendre compte du passé et du présent du monument. La caractérisation des altérations du tuffeau, la compréhension des mécanismes et la simulation des altérations est un volet complémentaire essentiel du diagnostic d'altération, relatif à la prévision de l'évolution des altérations, le futur du monument.

L'enjeu est, dans le même temps, de montrer comment traiter de manière scientifique un problème pratique lié à la conservation du patrimoine. Il s'agit de convaincre à la fois la communauté académique, et celle du patrimoine bâti, de la pertinence de cette approche.

La méthode de réalisation du carnet de santé, qui inclut la définition des données le constituant, comment et où les trouver, ainsi que le support pouvant être utilisé pour le représenter, est définie dans le chapitre 1. L'organisation et le traitement des données constituant le passé et le présent du monument trouvent une application dans les chapitres 2 et 3. Le chapitre 2 traite des données du passé par l'analyse des archives historiques ; le résultat de ce travail est un ensemble de deux cartographies : datation et nature des pierres. Le

¹²⁷ Suivi des Altérations, Caractérisation et REstauration des monuments en pierres calcaires

chapitre 3 reprend la même méthode, appliquée à la cartographie des altérations à partir d'observations in-situ. Le diagnostic d'altération, dont la finalité est d'anticiper l'avenir du monument, fait appel à la fois à une analyse approfondie du carnet de santé, mais aussi à des expérimentations en laboratoire. L'analyse croisée entre les différentes cartographies et les données historiques, exposée dans le chapitre 4, a permis d'estimer l'aspect temporel des processus d'altération. La caractérisation physico-chimique en laboratoire d'échantillons prélevés in-situ, menée dans le chapitre 5, permet une meilleure compréhension des processus d'altération, ainsi que la mise en évidence d'un facteur d'altération systématique. Grâce à un plan expérimental de vieillissement artificiel, relaté dans le chapitre 6, le rôle de ce facteur dans les altérations du château de Chambord a pu être clarifié. Enfin, le chapitre 7 propose un élargissement de la problématique et une autre manière de réaliser le carnet de santé de l'édifice.

Conception générale du carnet de santé

Les différentes étapes de la construction du carnet de santé sont illustrées à partir de deux éléments du château de Chambord : la façade Sud et la tour de chaudron. Cette méthodologie peut bien entendu s'appliquer à n'importe quel monument.

Les données à collecter sont variées, il s'agit de sources anciennes comme les archives manuscrites ou iconographiques traitant de l'histoire du monument, des devis, mémoires et notices techniques de travaux de restauration et de réaménagement, ou encore d'observations *in situ* de l'état actuel des parements, de manière visuelle ou par l'intermédiaire de techniques non destructives comme la thermographie infrarouge.

Étude du passé

Le rappel du cadre historique dans lequel se situe le château de Chambord a permis d'illustrer les différentes carrières exploitées ainsi que les choix techniques effectués au cours des siècles. L'objectif était de retracer les différentes étapes de construction et les restaurations qu'ont subies les deux façades étudiées à l'échelle de la pierre. Ce travail d'enquête a sans cesse été perturbé par l'état lacunaire des sources, leurs lieux de conservation variés et leur degré inégal de précision en fonction des périodes. A l'issue de ce travail, chaque pierre porte deux attributs : une date et une provenance. Cependant, celles-ci sont parfois

incertaines et à défaut d'attributs précis, des caractéristiques plus élargies leur ont été attribuées : une période, une nature.

Les cartographies réalisées permettent de rendre compte de l'étendue des restaurations effectuées sur ces façades. L'aile Sud a été restaurée à hauteur de 50 % de ses surfaces extérieures, alors que la tour du Chaudron, plus en retrait, ne présente que 30 % de surface extérieure restaurée. Les cartographies mettent également en évidence des calcaires lacustres utilisés pour les soubassements, du tuffeau, et enfin des calcaires fins, moins poreux et plus résistants que le tuffeau, largement employés en restauration dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

Étude du présent

À partir d'observations *in situ* des façades étudiées et d'une synthèse de la description des typologies d'altérations, des cartographies d'altération ont été tracées à l'échelle de la pierre. En cherchant à corréliser les cartographies réalisées avec les conditions environnementales, il a été possible de tenter d'identifier les facteurs environnementaux statistiquement associés à ces altérations. Ces facteurs sont divers, et peuvent être climatiques, anthropiques et/ou être liés à la nature de la pierre et à sa position dans l'ouvrage.

Les altérations biologiques sont dominantes sur les façades étudiées. Les lichens recouvrent 43,2 % de la tour du Chaudron et 14,3 % de l'aile Sud. Ce sont les multiples restaurations de l'aile Sud qui expliquent en grande partie sa faible colonisation. Les mousses en revanche, sont beaucoup plus ponctuelles et concernent moins d'1 % des façades. Le développement des mousses et des lichens est surtout fonction du relief et de l'orientation, indépendamment de la nature des pierres.

Les cassures au niveau des reliefs ne concernent que la tour du Chaudron, dans une très faible proportion de 0,4 %. L'aile Sud n'en comporte plus, en raison des remplacements récents de ces pierres cassées.

Concernant les desquamations, qui sont les altérations les plus dommageables et de surcroît irréversibles, c'est la tour du Chaudron qui est la plus touchée. Cette altération représente 5,1 % des parements de la tour, avec une majorité de desquamations en plaques, et 0,5 % de l'aile Sud avec une majorité de desquamations en feuillets cette fois. Les calcaires lacustres sont totalement exempts de ce type d'altération, leurs propriétés les rendant plus résistants à l'altération. Les desquamations en feuillets peuvent toucher à la fois les tuffeaux et

les calcaires plus durs comme la pierre de Richemont, et sont surtout fonction de l'orientation. Les desquamations en plaques, en revanche, touchent exclusivement les tuffeaux, de mêmes que les fissures verticales longeant les arêtes vives, ces deux altérations étant vraisemblablement liées.

Estimation du temps de développement des altérations

Le Tableau 5 récapitule les différentes altérations relevées et cartographiées, et l'influence de l'orientation et de l'environnement sur leur développement. Les facteurs envisagés pour expliquer l'origine de la dégradation sont également indiqués.

L'utilisation des données textuelles et iconographiques provenant des recherches historiques ont complété l'analyse précédente en y introduisant une notion temporelle : ces textes et images ont permis d'évaluer le temps de développement d'une altération sur une pierre neuve, et d'affirmer l'existence d'une altération à une époque donnée, et dans le cas contraire, d'en estimer sa période d'apparition.

Grâce à la confrontation des données historiques et des relevés de l'état présent d'altération, un premier ordre de grandeur a été estimé : celui du temps mis par une altération pour croître jusqu'à devenir visuellement observable. Il s'agit du temps écoulé depuis la pose de la pierre lorsque les conditions nécessaires au développement de l'altération sont réunies (Figure 68).

Les altérations biologiques sont superficielles, et ne sont pas reliées aux caractéristiques physico-chimiques des pierres. Ces altérations ont toujours existé depuis la construction du château, et leur temps de développement est rapide. Sur les reliefs horizontaux, les mousses peuvent mettre plus de quarante ans à s'installer, alors qu'il faut moins de cinq ans aux lichens pour se développer. Le temps de développement des lichens est en revanche plus long pour les parements verticaux.

Les desquamations en feuillets affectent la superficie de la pierre de manière irréversible. Une zone abritée de l'action directe des pluies mais néanmoins humide, et une zone située sous le vent, garantissant un séchage lent, sont des conditions qui semblent permettre le développement de cette forme de desquamation. Les feuillets peuvent apparaître moins de soixante ans après la pose de la pierre si ces conditions sont réunies. L'altération est plus rapide en hauteur qu'en partie basse des parements, et le temps de développement semble deux fois plus long pour la pierre de Richemont que pour le tuffeau.

Les desquamations en plaques, à l'inverse de celles en feuillets, se développent sur les parties exposées des parements, et peuvent provoquer des problèmes de sécurité, en plus d'un effet inesthétique, une fois la plaque tombée. Ce type de dégradation est difficilement corrélable à l'orientation ou à la position de la pierre sur le bâtiment. Il semblerait qu'un relief ou qu'un élément perturbateur puisse parfois être à l'origine de l'altération, par génération d'une fissure sous la surface, ou bien par aggravation d'une fissure préexistante et détachement de la plaque. Cet élément perturbateur semble souvent être la conséquence d'une restauration avec remplacement de pierres et de mortiers de rejointoiement. Dans le cas de remplacements en pierre de Richemont, les desquamations en plaques observées sur les tuffeaux aux alentours se développent en moins de cinquante ans. D'autres cas sont observés, dont les restaurations en pierre de tuffeau datent du milieu du XIX^e siècle et où l'altération en plaques est apparue moins de cent dix ans après, sans juxtaposition avec des pierres de Richemont.

Ces premières estimations de cinétique, bien que reposant sur des données parfois lacunaires, permettent de proposer des perspectives d'évolution de l'état du monument.

Caractérisation des desquamations en laboratoire

L'état de l'art relatif aux facteurs et aux mécanismes de l'altération par desquamation a permis de recenser les facteurs les plus probables associés à ces altérations, ainsi que les mécanismes les plus vraisemblables : imperméabilisation de la surface puis dissolution subsurfacique suite à une modification des circulations d'eau ; fatigue mécanique du matériau suite à des cycles thermo-hydriques différentiels entre l'épaisseur soumise aux variations climatiques et le cœur ; accumulation de gypse par phénomène de marée entraînant modification des propriétés du matériau et pression de cristallisation.

Les analyses pratiquées sur tous les échantillons prélevés ont montré la présence significative de gypse avec un maximum systématiquement situé au niveau de la fissure proche de la surface exposée de la pierre. La provenance de ce gypse est évaluée au regard des différentes hypothèses issues de la littérature et du contexte environnemental de Chambord. L'étude des desquamations en feuillets a permis de discriminer les processus de formation de cette altération par comparaison avec ceux des desquamations en plaques.

Simulation du vieillissement

La dernière partie de cette thèse est consacrée à la reproduction en laboratoire de la distribution du gypse telle qu'elle a été caractérisée sur des échantillons altérés par desquamation à Chambord, grâce des tests de vieillissements artificiels utilisant différentes sources de soufre et selon des protocoles variés. Suite à une série de tests préliminaires ayant permis de vérifier les conditions de formation du gypse, les paramètres suivants ont été étudiés : mode de transport du polluant (dépôt de gypse en surface, imbibition d'acide sulfurique, injection de SO_2 gazeux sous vide) ; pré-fissuration de l'échantillon (sans fissure, fissure parallèle à la surface, fissure orthogonale à la surface) ; isolation de l'échantillon pendant le séchage (sans isolation, isolé en ne laissant que la surface exposée libre, isolé en ne laissant que la surface opposée à l'exposition libre). Il résulte de ces multiples tests que l'apport d'eau et de gypse ne permet pas de faire migrer une quantité significative de gypse à l'intérieur de la pierre. L'imbibition d'acide sulfurique est la méthode qui maximise la quantité de gypse formée, mais principalement dans le 1^{er} millimètre sous la surface, et très peu ensuite. Finalement, l'apport de SO_2 gazeux sec suivi d'une imbibition partielle est le seul protocole ayant permis la précipitation d'une quantité importante de gypse à cœur, avec un maximum au niveau du front d'imbibition. Les paramètres liés au séchage restent secondaires, et la pré-fissuration ne joue que lorsqu'elle est orthogonale à la surface, permettant à l'acide sulfurique de former du gypse dans cette fissure.

Grâce à cette simulation en laboratoire, il paraît réaliste de conclure que la distribution du gypse telle que caractérisée sur une desquamation en feuillets semble résulter d'une attaque par l'acide sulfurique, alors que celle caractérisée sur une desquamation en plaques ne peut provenir que du SO_2 atmosphérique suivi d'épisodes pluvieux. Le rôle du gypse dans les phénomènes de desquamation n'a pas été discriminé pour autant.

Un processus global décrivant les différentes étapes de l'altération en plaques a été proposé. Ce processus fait appel à la fois à un apport de SO_2 atmosphérique et à une fatigue de la zone soumise aux variations d'humidité par dilatation thermo-hydrique différentielle, sans qu'il soit possible d'en préciser avec certitude l'importance relative ni la chronologie. La combinaison de ces deux facteurs paraît être l'hypothèse la plus probable pour expliquer l'initiation et la propagation une fissure parallèle à la surface, symptomatique d'une desquamation en plaques.

Perspectives

Pour améliorer le support du carnet de santé, et passer au carnet de santé numérique, il est désormais possible de disposer des résultats d'un travail mené en parallèle, et dont le cahier des charges a été défini grâce à cette thèse : la définition d'une interface de dessin de cartographies associée à une base de données référencée dans un modèle 3D de l'ouvrage, adaptée à partir de la plateforme NUBES. Les nouvelles fonctionnalités, non utilisées dans le cadre de cette thèse, offrent à la fois la possibilité d'enregistrer tout type de documentation, de pouvoir tracer les cartographies sur toutes les surfaces d'un ouvrage, et non pas seulement celles que l'on peut voir sur une frise, l'automatisation des calculs d'aire associée aux cartographies ainsi que des calculs de corrélation statistique. En somme, il s'agit d'améliorer l'efficacité de toutes les étapes décrites dans cette thèse, pour les rendre à la fois plus exhaustives, plus rapides, plus quantitatives et plus accessibles.

La première perspective de ce travail de conception du carnet de santé consiste à utiliser cette nouvelle interface pour enregistrer et analyser toutes les informations disponibles. L'enjeu sera à la fois de réaliser le carnet de santé numérique du château de Chambord, et de proposer des analyses plus précises, voire de nouvelles analyses.

Dans le cadre du diagnostic de la desquamation en plaques, le prolongement de ce travail serait la vérification des hypothèses avancées et de celles rejetées, par la réalisation de nouveaux protocoles de simulation expérimentale, en s'intéressant cette fois aux mécanismes de dilatation thermo-hydriques et aux relations de cause à effet qu'il peut y avoir entre les phénomènes de dilatation et la présence de gypse.

Enfin, si les mécanismes sont clairement identifiés d'un bout à l'autre de la chaîne d'une pierre saine à une pierre desquamée, et qu'il est possible d'estimer des dates et des durées en relation avec ces différentes étapes de formation de la plaque, il sera alors peut-être possible d'établir des modèles de simulations numériques du développement de ces altérations, et d'évaluer leur évolution dans le temps. La représentation graphique de l'évolution de l'étendue d'une altération est déjà un outil qui a été imaginé dans NUBES, et l'apport de la simulation numérique permettrait de quantifier cette évolution en fonction de paramètres établis par la simulation expérimentale.

RÉFÉRENCES

- Akbaylar I. et Hamamcioğlu-Turan M., 2007, Documentation of a vernacular house with close-range digital photogrammetry, *XXI International CIPA Symposium*, 1-6 octobre 2007, Athènes, Grèce
- Al-Kheder S., Al-Shawabkeh Y., Haala N., 2009, Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry, *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, pp. 537-546
- Androuet Du Cerceau J., *Les plus excellents Bâtiments de France*, t. 1, 1576
- Arnold A., Zehnder K., 1989, Salt weathering on monuments, *La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*, Bari, pp. 31-58
- Aubourg-Josset V. et Josset D., 1996, DFS d'opération de surveillance archéologique, février à juin 1996, *Service régional de l'Archéologie*, non publié – Médiathèque de l'architecture et du Patrimoine
- Auger, 1991, Vieillissement par altération atmosphérique des matériaux de construction. Etude comparative *in situ* et en simulation, *La détérioration des matériaux de construction / Colloque international, symposium*, 12-14 juin 1991, La Rochelle, p. 115-128
- Ausset P., Crovisier J.L., Del Monte M., Furlan V., Girardet F., Hammecker C., Jeannette D., Lefevre R.A., 1996, Experimental Study of Limestone and Sandstone Sulphation in Polluted Realistic Conditions: The Lausanne Atmospheric Simulation Chamber (LASC), *Atmospheric Environment*, vol. 30, n°18, pp. 3197-3207
- Babelon J.P. et Chastel A., 1994, *La notion de patrimoine*, 1^{ère} édition *Revue de l'Art* n°49, et réédition en 1994, Editions Liana Levi, 141 p.

- Bai Y., Thompson G.E., Martinez-Ramirez S., Brüeggerhoff S., 2003, Mineralogical study of salt crusts formed on historic building stones, *Science of The Total Environment*, n° 302 vol. 1-3, pp. 247-251
- Bai Y., Thompson G.E., Martinez-Ramirez S., 2006, Effects of NO₂ on oxidation mechanisms of atmospheric pollutant SO₂ over Baumberger Sandstone, *Building and Environment*, vol. 41, n°4, pp. 486-491
- Baltsavias E.P., 1996, Digital ortho-images - a powerful tool for the extraction of spatial-and geo-information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 51, n°2, pp.63 – 77
- Bard F., 2011, *Etude expérimentale et modélisation d'un procédé semi-continu de neutralisation d'une solution d'acide sulfurique par une suspension de calcite conduisant à la formation de gypse par conversion et par précipitation*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
- Beck K., 2006, Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 213p.
- Beck K., Al Mukhtar M., 2008, Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone, *Environmental Geology*, vol. 56. n° 3-4, pp.715-727.
- Beck K., Al-Mukhtar M., 2010, Weathering effects in an urban environment: a case study of tuffeau, a French porous limestone, *Geological Society, London, Special publication*, vol. 331, pp.103-111
- Benavente, D., Cultrone, G. and Gomez-Heras, M., 2008, The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones, *European Journal of Mineralogy*, vol. 20, pp. 673-685
- Berthonneau J., Grauby O., Bromblet P., Vallet J. M., Dessandier D., Baronnet A., 2012, Role of swelling clay minerals in the spalling decay mechanism of the « pierre du midi » limestone (South-East of France), *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, 22-26 octobre 2012, New York, États-Unis

- Bessac J.C., 2004, Pierre de taille : archéologie et technique, *La construction, les matériaux durs : pierre et terre cuite*, ouvrage collectif, Collections « Archéologiques » dirigées par Alain Ferdière, Paris, pp. 7-50
- Bigas J.P. et Martinet G., 2009, *Pierre et Patrimoine : Connaissance et conservation*, Actes Sud, Arles, 212 p.
- Birginie J.-M., Auger F., Rivas Brea T., 2000, Changes in the permeability to gas of calcareous stone core samples exposed to salt spray, *Materials and Structures*, vol. 33, pp.331-337
- Blanc, A., Jaton C., 1970, *Le Tuffeau de Saint-Cyr-en-Bourg*, Rapport LRMH-P98
- Böke H., Göktürk E.H., Caner-Saltık E.N., and Demirci Ş., 1999, Effect of airborne particle on SO₂-calcite reaction, *Applied Surface Science*, vol. 140, n°1-2, pp. 70-82
- Bost M., 2008, Altération par le gel des massifs rocheux : Etude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- Bouchelaghem F, 2010, A Numerical and analytical study on calcite dissolution and gypsum precipitation. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, n°2, pp. 467-480
- Bournon F., 1911, Blois, Chambord et les châteaux du Blésois, Paris, 144 p.
- Brandi C., 1963, *Théorie de la restauration*, Réédition en 2007, Editions du patrimoine, Paris, 207p.
- Brimblecombe P., Grossi C.M.n 2009, Millennium-long damage to building materials in London, *Science of The Total Environment*, vol. 407, n°4pp. 1354-1361
- Bromblet P., 1992, *Argenton-Château (Deux-Sèvres, 79). Église Saint-Gilles. Portail : État De Conservation De La Pierre*, Rapport LRMH-889A
- Bromblet P., 1994., *Jarzé (Maine-et-Loire, 49). Chapelle De Montplacé. Portail Ouest Sous Porche : État De Conservation*, Rapport LRMH-946A
- Brunet A., Oriol G., 1992, Le cloître d'Elne : les chapiteaux face à l'attaque bactérienne, *La conservation de la pierre monumentale en France*, ouvrage collectif sous la direction de Philippon J., Jeannette D., et R.A. Lefèvre, presses du CNRS, pp. 159-163

- Brunetaud X., De Luca L., Janvier-Badosa S., Beck K., and Al-Mukhtar M., 2012a, Application of digital techniques in monument preservation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, n°5, pp. 543-556
- Brunetaud X., Stefani C., Janvier-Badosa S., Beck K., and Al-Mukhtar M., 2012b, Comparison between photomodeling and laser scanning applied to realizing 3D model for digital health record, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, n°1, pp. 48-63
- Brunet-Imbault B., 1999, Etude des patines de pierres calcaires mises en œuvre en région Centre, Thèse de doctorat, Université d'Orléans
- Bryant S., 2000, *Le Château de Chambord : l'aile Sud du château, rapport de surveillance archéologique des travaux d'aménagement de l'accueil*, Décembre 1999 à Janvier 2000, INRAP
- Bryant S., Ponsot P., Hofbauer D., Caillou J.-S., 2007, *Le château de Chambord (Loir-et-Cher) – Un monument trop (peu) regardé*, *Medieval Europe, 4e Congrès International d'Archéologie Médiévale et Moderne*, 3-8 septembre 2007, Paris, France
- Caillou J.S. et Hofbauer D., 2007, *Chambord, le projet perdu de 1519*, Archéa, Tours, 64 p.
- Camuffo D., 1995, Physical Weathering of Stones, *Science of The Total Environment*, vol. 167, n°1-3, pp. 114
- Caneva G. et Salvadori O., 1987, Altération biologique de la pierre, *La dégradation et la conservation de la pierre*, textes des *cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre*, sous la direction de Lazzarini L. et Pieper R., 265 p.
- Caneva G., Gori E., Montefinale T., 1995, Biodeterioration of monuments in relation to climatic changes in Rome between 19–20th centuries, *The Deterioration of Monuments*, vol. 167 n°1-3, pp.205–214
- Cautru J.P., 1976, *Le Tuffeau de Touraine - Étude de son altération*, Rapport BRGM Orléans - 76 SGN 012 MTX
- Charola A.E., Herrodotus, 2000, Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview, *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 39, n°3, pp. 327-343
- Charola A.E., Puhlinger J., Steiger M., 2007, Gypsum: a Review of its role in the deterioration of Building Materials, *Environ.Geol.* vol. 53, p. 339-352

- Châtenet M., 2001, *Chambord*, Editions du Patrimoine, 279 p.
- Chauris L., 2011, Pour une géo-archéologie du Patrimoine : pierres, carrières et constructions en Bretagne, Deuxième partie : Roches sédimentaires, *Revue archéologique de l'Ouest*, n° 27, p. 171-208
- Chéné G., Bastian G., Brunjail C., Laurent J.P., 1999, Vieillissement accéléré de Blocs de Tuffeau en laboratoire sous l'effet de cycles d'imbibition-séchage, *Materials and Structures*, vol. 32, pp. 525-532
- Clément J.P., Grua B., Bastian G., Legrand J., Burlot R., Cerepi A., 1990, *Etudes des tuffeaux du Sud-Saumurois*, rapport financé par la Maison du tuffeau et le Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire (cote LRMH P558)
- Cobourn W.G., Gauri K.L., Tambe S., Li S., Saltik E., 1993, Laboratory Measurements of Sulfur Dioxide Deposition Velocity on Marble and Dolomite Stone Surfaces, *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, vol. 27, n° 2, pp. 193-201
- Colas E., Mertz J.D., Thomachot-Schneider C., Barbin V., Rassineux F., 2011, Influence of the Clay Coating Properties on the Dilation Behavior of Sandstones, *Applied Clay Science*, vol. 52, n° 3, pp. 245-252
- Connor M., Girardet F., 1992, Etude du mode de fixation du soufre sur un grès calcareux, *7th International congress on deterioration and conservation of stone*, Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992, vol. 1, pp. 407-416
- Craddock P.R., Rouxel O.J., Ball L.A., Bach W., 2008, Sulfur Isotope Measurement of Sulfate and Sulfide by High-resolution MC-ICP-MS, *Chemical Geology*, vol. 253, n° 3-4, pp. 102-113
- Croy J. de, 1894, *Nouveaux documents pour servir à l'histoire de la création des résidences royales des bords de Loire*, Paris Alph, Picard et fils
- Del Monte M., Sabbioni C., and Vittori O., 1984a, Urban Stone Sulphation and Oil-fired Carbonaceous Particles, *Science of The Total Environment*, vol. 36, pp. 369-376
- Del Monte M., Sabbioni C., Ventura A., and Zappia G., 1984b, Crystal Growth from Carbon Carbonaceous Particles, *Total Envir*, vol. 36, pp. 247-254

- Del Monte M. et Sabbioni C., 1986, Chemical and biological weathering of an historical building : Reggio Emilia Cathedral, *Science of the Total Environment*, vol. 50, pp. 165-182
- De Luca L., Busayarat C., Stefani C., Véron P., Florenzano M., 2011, A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage, *Computers and Graphics*, vol. 35, n°2, pp.227-241
- Derbez M., 1999, *Rôle des apports atmosphériques dans l'altération de calcaires tendres en environnement urbain : la cathédrale de Tours*, Thèse de doctorat, Université Paris XII, 241 p.
- Desbois (Père et Fils), 1894, Notice des travaux de restauration exécutés au château de 1882 à 1894, Paris, 25 p.
- Dessandier D., 1995. Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre, Thèse de doctorat, Université de Tours
- Dessandier D., 2000, *Guide méthodologique des monuments en termes de durabilité et compatibilité*, en collaboration avec Auger P., Haas H. and Hugues G., rapport BRGM
- Doehne E., Price C.A., 2010, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Technical Report. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 158 p.
- Esquieu Y. et Hartmann-Virnich A., 2007, Les signes lapidaires dans la construction médiévale : études de cas et problèmes de méthode, *Bulletin monumental*, vol. 165, n°1, pp. 331-358
- Fassina V., 1987, Pollution atmosphérique et alteration de la pierre, textes des *cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre*, sous la direction de Lazzarini L. et Pieper R., 265 p.
- Félix C., 1985, Altérations Desquamantes et Composés Soufrés d'origine Atmosphérique : Cas des Grès tendres Molassiques de quelques Monuments Lausannois, *5e congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, 25-27 septembre 1985, Lausanne, Suisse, pp. 391-409
- Fitzner B., Heinrichs K., La Bouchardière D., 2002, Damage index for stone monuments, *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*, Seville, Espagne, 5-8 Avril 2000, pp. 315-326
- Flaubert G., Du Camp M., *Par les champs et par les grèves*, publication posthume 1885
- Fronteau G., Moreau C., Thomachot-Schneider C., Barbin V., 2010, Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, vol. 115, pp. 158-166
- Furlan V., Girardet F., 1988, Vitesse d'accumulation des Polluants Soufrés sur les Pierres en œuvre, *6e Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, 12-14 septembre 1988, Torun, Pologne, pp. 293-300.
- Furlan V., Girardet F., 1992, Pollution atmosphérique et réactivité des pierres, *7th International congress on deterioration and conservation of stone*, Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992, vol. 1, pp. 153-161
- Gaylarde C., Ribas Silva M., Warscheid T., 2003, Microbial impact on building materials: an overview, *Materials and structures*, vol. 36, pp. 342-352
- Girardet F., Furlan V., 1996., Réactivité des pierres au SO₂ atmosphérique, étude en chambre de simulation et corrélation avec les mesures en site réel, *8e international congress on deterioration and conservation of stone*, 30 septembre-4 octobre 1996, Berlin, Allemagne, pp. 341-347
- Girardet F., Furlan V., Ausset P., Del Monte M., Jeannette D., Lefevre R.A.. 1996, Étude expérimentale de la prise de soufre d'un calcaire et d'un grès calcareux dans la chambre de simulation atmosphérique de Lausanne, *8e international congress on deterioration and conservation of stone*, 30 septembre-4 octobre 1996, Berlin, Allemagne, pp. 349-358
- Gomez-Heras M., Smith B.J., Viles H.A., 2008, Laboratory modelling of gypsum crust growth on limestone related to soot pollution and gaseous sulphur : Implications of 'cleaner' environments for stone decay, *11th International Congress on Deterioration and Conservation of stone*, Torun, Pologne
- Gorget C., 1990, Carrières et carriers d'Apremont-sur-Allier-sur-Allier (XVII^e – XVIII^e siècles), *Cahiers d'Archéologie et d'Histoire du Berry*, n° 102, pp. 3-16
- Grossi C.M., Esbert R.M., Díaz-Pache F., Alonso F.J., 2003, Soiling of Building Stones in Urban Environments, *Building and Environment*, vol. 38, n° 1, pp. 147-159

- Grossi C.M., Murray M., 1999, Characteristics of Carbonate Building Stones That Influence the Dry Deposition of Acidic Gases, *Construction and Building Materials*, vol. 13, n° 3, pp. 101-108
- Guillaume J., Gaston A., Lagoutte C., Lebouteux P., Mary C., 1983, Comprendre Chambord, *Dossier Technique* n°2, CNMHS, pp.81-103
- Halliday E.C., 1961, Historique De La Pollution Atmosphérique, *World Health Organization*, Monograph Series, N° 46, Genève
- Hammecker C., 1987, *Évolution des caractéristiques de roches calcaires en fonction de leur altération - Exemple de la façade Ouest de Notre-Dame-la-Grande de Poitiers*, DEA Université de Poitiers
- Hammecker C., 1993, *Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 261 p.
- Haneef S.J., Johnson J.B., Jones M., Thompson G.E., Wood G.C., Azzaz S.A., 1993, A laboratory simulation of degradation of Leinster granite by dry and wet deposition processes, *Corrosion Science*, vol. 34, n° 3, pp. 511-524
- Hofbauer D., 2002, Les signes lapidaires de Chambord : apport à la chronologie de l'aile royale, *Actes du XIIIe colloque international de glyptographie*, Venise, 2002, pp. 311-325
- Hofbauer D., 2004, Les signes lapidaires du château de Chambord, premières observations, *Actes du XIV^e colloque international de glyptographie*, Chambord, pp. 319-332
- Hugo V., 1825, Guerre aux démolisseurs, *Revue des Deux Mondes*, t.5, 1825-1832
- Humbert L., 1999, Comment protéger le tuffeau de la desquamation ? Méthodes analytiques et expérimentales : L'exemple de la Cathédrale Saint-Gatien à Tours, *Monuments historiques et environnement: recherches franco-allemandes sur la conservation de la pierre et du vitrail 1988-1996, Colloque final*, 25-26 février 1997, Strasbourg, France, pp. 112-121.
- Janvier-Badosa S., Beck K., Brunetaud X., and Al-Mukhtar M., 2012, Historical study of Chambord castle: a basis for establishing the health record of the monument, *Int. Journal of Architectural Heritage*, vol. 7, n°3, pp. 247-260
- Jarry L., 1888, Le château de Chambord : documents inédits sur la construction et le nom de ses premiers architectes, *Mémoires de la société archéologique de l'Orléanais*, t. 22, pp. 535-598

- Jeannette D., Brillanceau A., Louail J., Macaire J.J., Ozouf J.C., 1985, Etude préliminaire des altérations des tuffeaux du Saumurois et du Chinonais, Rapport (cote LRMH P528)
- Jeannette D., 1992, Morphologie et nomenclature des altérations, *La conservation de la pierre monumentale en France*, ouvrage collectif sous la direction de Philippon J., Jeannette D., et R.A. Lefèvre, presses du CNRS, pp. 51-72
- Johannot E., 2001, *Nouvelles Observations à Chambord*, mémoire de maîtrise sous la direction de J. Guillaume, CESR Tours
- Kloppmann W., Bromblet P., Vallet J.M., Vergès-Belmin V., Rolland O., Guerrot C., Gosselin C., 2011, Building Materials as Intrinsic Sources of Sulphate: A Hidden Face of Salt Weathering of Historical Monuments Investigated Through Multi-isotope Tracing (B, O, S), *Science of The Total Environment*, vol. 409, n° 9, pp. 1658-1669
- Kucera, V., 2000, Dose-reponse Functions as a Basis for Assessment of Acceptable Levels, *4th European Commission Conference, Research for protection, conservation and enhancement of cultural heritage : opportunities for European enterprises*, 22-24 novembre 2000, Strasbourg, France, p. 45–50
- Lallemant R., 1992, Les altérations biologiques de la pierre : Le rôle des lichens, *La conservation de la pierre monumentale en France*, ouvrage collectif sous la direction de Philippon J., Jeannette D., et R.A. Lefèvre, presses du CNRS, pp.95-100
- Lambers K., Eisenbeiss H., Sauerbier M., Kupferschmidt D., Gaisecker T., Sotoodeh S., Hanusch T., 2007. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru, *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, n° 10, pp. 1702 – 1712
- La Saussaye L. de, 1834, *Notice sur le domaine de Chambord*, Blois, (12^e éd. 1875)
- Lazzarini L., Tabasso M.L., 1989, *La Restauration de la Pierre*, Trad. de l'italien par J. Philippon, ERG Edition, 264 p.
- Lebouteux P., 1983, Les travaux de restauration, *Dossier Technique* n°2, CNMHS, pp. 107-111
- Lefèvre, 1992, Les effets de la pollution atmosphérique, *La conservation de la pierre monumentale en France*, ouvrage collectif sous la direction de Philippon J., Jeannette D., et R.A. Lefèvre, presses du CNRS, pp. 83-87

- Lefevre R.A., 2004, *Modélisation des effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux des bâtiments (calcaire, mortier, verre)*, Programme de recherche inter organisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA-Unité Mixte de Recherche CNRS - Universités Paris VII et Paris XII, n° 7583) Groupe de Recherche sur les Interactions Matériaux-Atmosphères, Rapport
- Lesueur F. et P., 1931, Les dernières étapes de la construction de Chambord, *Bulletin Monumental*, vol. 109, n°1, pp. 7-40
- Letavernier G., 1984, *La gélivité des roches calcaires, Relation avec la morphologie du milieu poreux*, Thèse de doctorat, Université de Caen, 181 p.
- Lo Buglio D. et Derycke D., 2009, *Procédure de relevé par orthophotographie de façades intérieures du musée Van Buuren*, rapport en ligne
- Lorain J.M., 1973, La géologie du calcaire de Beauce, *Bulletin Liaison labo P. et Ch. Spécial*, pp. 14-53
- Lorenz J., 1991, Les pierres du Nivernais, Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes, *Actes du 115e congrès national des sociétés savantes*, Paris, 1991, pp. 411-421.
- Martin-Demézil J., 1986, *Chambord*, Société Française d'Archéologie, Paris, 115 p.
- Martinet G., Macaire J.J., 1991, Étude des Tuffeaux en œuvre dans la Cathédrale Saint-Gatien de Tours (Indres-et-Loire), *Carrières et Constructions en France et dans les pays limitrophes*, pp. 337–350
- McGreevy J. P., B. J Smith, 1984, The possible role of clay minerals in salt weathering, *Catena*, vol. 11, pp. 169-75
- Mertz J.D., 2001, *Blois - 41, Loir-et-Cher (Centre) Château Aile François Ier Escalier - Diagnostic de l'état des surfaces, caractérisation des altérations et des patines. Définition des conditions de consolidation*, Rapport LRMH-1103A
- Mertz J.D., Verzier P, s.d., *Entretien et restauration du patrimoine architectural, Résumé des résultats de la phase typologie des altérations*, rapport BRGM/CRITT
- Mertz J.D., Guiavarc'h M., 2012, *Simulation expérimentale des altérations, Rapport du projet SACRE*

- Meurer M., Vogt J., 1999, Contributions de la climatologie au diagnostic et à la conservation des monuments historiques : L'exemple de la Cathédrale de Meissen, *Études sur l'efficacité des produits de consolidation des tuffeaux de la cathédrale Saint-Gatien de Tours*, pp. 158-177
- Mohen J.P., 1999, *Les Sciences du Patrimoine, identifier, conserver, restaurer*, Editions Odile Jacob, Paris, 370 p.
- Montel C., 2007, Etude pétrographique de la pierre d'Asnières et de son utilisation dans l'agglomération dijonnaise, *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, vol 11
- Moucheboeuf C., 1994, *Le Décor sculpté de Chambord : sculpture miniature, l'art des chapiteaux à figures de la Première Renaissance*, Thèse de 3e cycle de l'école du Louvre, 306 p.
- Mussat A., 1991, La rivière et la carrière : l'exemple des pays de la Loire, *Congrès : Les chantiers de la Renaissance*, Tours ,1983-84, 11-26
- Núñez-Andrés M.A. et Buill Pozuelo F., 2009, Evolution of the architectural and heritage representation, *Landscape and Urban Planning*, vol. 91, n°2, pp.105-112
- Paquet P., 1937, La remise en état des communs du château de Chambord, *Monuments historiques de la France*, 1937, 3, p. 221-225
- Pauly J.P., 1990, *Altération de la Pierre en œuvre en relation avec la climatologie et l'architecture. Simulation et produits de protection*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 329 p.
- Penet G., 1963, Les travaux de Jules Hardoin-Mansard à Chambord, *mémoires de la société des sciences et lettres de Loir-et-Cher*, vol. 34, pp. 7-37
- Perrault C., 1669, *Mémoires de ma vie, Voyage à Bordeaux*, Paris 1909
- Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F., 2011, Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation, *Geoinformatics FCE CTU Journal*, vol. 6, pp. 291-299
- Pochon J., 1968, Facteurs biologiques de l'altération des pierres, *Monumentum*, vol. 2
- Ponsot P., 2003, Pourquoi lire Cesare Brandi ?, *Bulletin monumental*, vol. 161, n°1, pp. 223-229

- Prick A., 1996, Utilisation de la méthode dilatométrique dans l'étude expérimentale de l'altération de calcaires et de granites par du sulfate de calcium, *Proceeding of the 1995 LCP Congress*, Montreux, pp. 177-185
- Prieto B., Seaward M.R.D, Edwards H.G.M, Rivas T., Silva B., 1999, An Fourier transform-Raman Spectroscopic Study of Gypsum Neoformation by Lichens Growing on Granitic Rocks, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 55, n° 1, pp. 211-217
- Prigent D. et Sapin C., 2004, La construction en pierres au Moyen Age, *La construction, les matériaux durs : pierre et terre cuite*, ouvrage collectif, Collections « Archéologiques » dirigées par Alain Ferdière, Paris, pp. 117-148
- Ranjard M., 1973, Contribution à l'étude du plan de Chambord, *Monuments historiques de la France*, Juillet-septembre 1973, p. 30-39
- Rautureau M., 2001. Tendre comme la pierre, ouvrage collectif sous la direction de Michel Rautureau. Ed. Conseil régional, Centre et Université d'Orléans
- Reveyron N., 2002, L'apport de l'archéologie du bâti dans la monographie d'architecture, *In situ*, vol. 2, revue en ligne
- Rigo C., 1990, *Étude de l'altération des matériaux pierreux en œuvre en Région Centre - Caractérisation chimique et pétrophysique des tuffeaux et de leur dégradation*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans
- Riontino C., Sabbioni C., Ghedini N., Zappia G., Gobbi G., Favoni O., 1998, Evaluation of Atmospheric Deposition on Historic Buildings by Combined Thermal Analysis and Combustion Techniques, *Thermochimica Acta*, vol. 321, n°1-2, pp. 215-222
- Rolland O., 1999, Les châteaux de la Loire malades du plâtre ?, *CoRé*, n°6, pp. 49-53
- Saiz-Jimenez C., 1997, Biodeterioration vs Biodegradation: The role of microorganisms in the removal of pollutants deposited on Historic Buildings, *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 40, n° 2-4, pp. 225-232
- Samson-Gombert C., 1993, *Influences d'un environnement urbain et maritime sur les altérations d'un calcaire en œuvre : la pierre de Caen*, Thèse de doctorat, Université de Caen, 298 p.

- Sanjurjo Sánchez J., Romaní J.R.V., Alves C., 2011, Deposition of particles on gypsum-rich coatings of Historic Buildings in urban and rural environments, *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 2, pp. 813-822
- Saygi G. et Hamamcioğlu-Turan M., 2009, Documentation of a historical streetscape with close range digital photogrammetry, *22nd CIPA Symposium*, 11-15 octobre, Kyoto, Japon
- Sebastian, E., Cultrone, G., Benavente, D., Fernandez, L. L., Elert, K. and Rodriguez-Navarro, C, 2008, Swelling damage in clay-rich sandstones used in the church of San Mateo in Tarifa (Spain), *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, pp. 66-76
- Sharma R.K., Gupta H.O., 1993, Dust pollution at the Taj Mahal: A case study, *Conservation of Stone and Other Materials: Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress "Conservation of Stone and Other Materials"*, 29 juin-1^{er} juillet 1993, Paris
- Siedel H., Klemm W., 2000, Evaluation of the environmental influence on sulphate salt formation at Monuments in Dresden (Germany) by sulphur isotope measurements, *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, p. 401-409
- Smith B. J., Török A., McAlister J. J., Megarry Y., 2003, Observations on the factors influencing stability of building stones following contour scaling: a case study of oolitic limestones from Budapest, Hungary, *Building and Environment*, vol. 38, n° 9-10, pp. 1173-1183
- Smith B.J. et Příkryl R., 2007, Diagnosing decay: the value of medical analogy in understanding the weathering of building stones, *Building stone decay: from diagnosis to conservation*, The Geological Society of London, vol. 271, pp. 1-8
- Soukupová J., Hradil D., Příkryl R., 2002., Chemical weathering of clay – rich sandstone matrix: controls and case studies, *Understanding and Managing Stone Decay. Proceeding of the International Conference Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network (SWAPNET 2001)*, Příkryl R. et Viles H. A. (eds.), pp. 263–271
- Sramek J., 1988, Sulphur isotopes in the revealing corrosion mechanisms of stones, *6e Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, 12-14 septembre 1988, Torun, Pologne, pp. 341-345

- Stefani C., De Luca L., Véron P., 2009, Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations : an approach for architectural heritage understanding, *International Journal for Interactive Design and Manufacturing*, vol. 4, pp. 61-74
- Stefani C., Brunetaud X., Janvier-Badosa S., Beck K., De Luca L., Al-Mukhtar M., Developing a toolkit for mapping and display stone alteration on a web-based documentation platform, *Journal of Cultural Heritage*, publication acceptée en mars 2012
- Thomachot C., 1998, *Caractérisation pétrophysique des tuffeaux de Chambord : étude de leur altération*, Mémoire de DEA, Université de Marne-le-Vallée et Université de Strasbourg I, 94p.
- Thomachot C., 2002, *Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts d'encroûtements noirs vernissés*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 263 p.
- Török Á., 2003, Surface strength and mineralogy of weathering crusts on limestone buildings in Budapest, *Building and Environment*, vol. 38, n° 9-10, pp. 1185-1192
- Török Á., Licha T., Simon K., Siegesmund S., 2011, Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation, *Environmental Earth Sciences*, vol. 63, n° 4, pp. 675-693
- Vallet, J.M., C. Gosselin, P. Bromblet, O. Rolland, V. Vergès-Belmin, and W. Kloppmann, 2006, Origin of Salts in Stone Monument Degradation Using Sulphur and Oxygen Isotopes: First Results of the Bourges Cathedral (France), *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 88 (1-3), pp. 358-362
- Van T.T., 2008, *Vieillissement du tuffeau en présence de sels : approche expérimentale et numérique*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 176 p.
- Vergès-Belmin V., 1992, La façade occidentale de Notre-Dame la Grande à Poitiers, *La conservation de la pierre monumentale en France*, ouvrage collectif sous la direction de Philippon J., Jeannette D., et R.A. Lefèvre, presses du CNRS, pp. 209-225
- Vergès-Belmin V., 2001, Altération des pierres mises en œuvre, *Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine*, sous la direction de Schrefler et Delage, éd. Hermès Science publication, pp. 191-235

- Vergès-Belmin V., Godin J., Brunjail C., Chéné G., 2001, Etudes de cas, l'église Notre-Dame-la-Grande de Poitiers et la cathédrale Saint-Gatien de Tours, *Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine*, sous la direction de Schrefler et Delage, éd. Hermès Science publication, pp. 307-329
- Vleugels G., Dewolfs R., Van Grieken R., 1993, On the memory effect of limestone for air pollution, *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, vol. 27, n° 12, pp. 1931-1934
- Warscheid T. et Braams J., 2000, Biodeterioration of stone: a review, *International Biodeterioration et Biodegradation*, vol. 46, pp. 343-368
- Wendler E. Klemm D.D., Snethlage R., 1990, Contour scaling on building facades - Dependence on stone type and environmental conditions, *Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*, 14-21 septembre 1990, Pavia, Italy
- Yvard J.-C., 1976. Chronologie et sédimentation des calcaires lacustres du Sud-Ouest du Bassin de Paris dans leur environnement structural, *Norais*. N°92, pp. 529-540.
- Les relevés photogrammétriques d'architecture de l'Inventaire général – Château de Chambord, 15 juin-15 septembre 1977
- Collectif, ICOMOS-ISCS, 2008, Glossaire illustré des formes d'altération de la pierre, coordonné par Vergès-Belmin V., Traduction en Français par Bromblet P., Vallet J.M. et Vergès-Belmin V.

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Proportion des différentes altérations de la tour du Chaudron associée à chaque nature de pierres.....</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 2 : Proportion des différentes altérations de l'aile Sud associée à chaque nature de pierres</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 3 : Pourcentage de surface saine associée à chaque nature de pierres</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 4 : Tableau récapitulatif du vocabulaire employé pour définir les altérations dans les différents textes consultés.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 5 : Tableau récapitulatif des facteurs d'altération identifiés.....</i>	<i>142</i>
<i>Tableau 6 : Caractéristiques moyennes du tuffeau (Beck, 2006 ; Dessandier, 1995).....</i>	<i>148</i>
<i>Tableau 7 : Récapitulatif des différentes provenances possibles du gypse et évaluation de leur probabilité....</i>	<i>188</i>
<i>Tableau 8 : Tableau récapitulatif des tests préliminaires réalisés pour vérifier les mécanismes de formation de gypse.....</i>	<i>197</i>
<i>Tableau 9 : Tableau récapitulatif des tests préliminaires réalisés pour vérifier les propriétés du gypse</i>	<i>201</i>
<i>Tableau 10 : Exemples de tests de sulfatation réalisés dans le cadre de dépôts de gypse en environnement urbain</i>	<i>203</i>
<i>Tableau 11 : Récapitulatif des différents protocoles réalisés</i>	<i>211</i>
<i>Tableau 12 : Synthèse des modifications texturales de surface observées.....</i>	<i>212</i>
<i>Tableau 13 : Temps d'imbibition mesurés pour les échantillons non fissurés et imbibés avec la solution de H₂SO₄.....</i>	<i>213</i>
<i>Tableau 14 : Données de l'état de surface des échantillons testés à 10 cycles d'imbibition/ séchage selon les trois protocoles de sources de gypse.....</i>	<i>215</i>
<i>Tableau 15 : Récapitulatif des résultats obtenus après 10 cycles d'imbibition/ séchage pour chacun des polluants appliqués.....</i>	<i>230</i>
<i>Tableau 16 : Avantages de l'utilisation de NUBES et d'un modèle 3D par rapport à des cartographies 2D.....</i>	<i>252</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Situation du domaine et du château de Chambord</i>	9
<i>Figure 2 : Vue aérienne du château de Chambord</i>	10
<i>Figure 3 : Plan du château de chambord</i>	12
<i>Figure 4 : Exemples de modifications de choix architecturaux - Aile Sud.</i> <i>Agrandissement des baies (a). différences d'implantation des assises (b) et porte murée (c)</i>	16
<i>Figure 5 : Exemples de signes lapidaires de l'aile Sud (a) et représentation graphique d'un signe (b)</i>	17
<i>Figure 6 : Exemple de différence de faciès entre pierres d'origine, pierres remplacées et pierres des soubassements, et exemple de juxtaposition de mortiers de rejointoiement différents - Aile Sud</i>	18
<i>Figure 7 : Exemple d'une travée de l'aile Sud (a), vue des différentes natures de pierres en imagerie thermique (b) et cartographie des pierres de richemont remplacées (c)</i>	19
<i>Figure 8 : Exemple de déformation liée à la perspective lorsque la photographie est prise de près (A) et exemple de limitation de la déformation lorsque la photographie est prise à une plus grande distance de la façade (B)</i>	24
<i>Figure 9 : Assemblage et frise finale de la façade extérieure de l'aile Sud et de la tour du Chaudron</i>	25
<i>Figure 10 : Exemples de cartographies pierre à pierre réalisées dans différentes disciplines</i>	27
<i>Figure 11 : Illustration de l'interface de dessin vectoriel utilisée, détail de l'aile Sud</i>	28
<i>Figure 12 : Exemple de calcul d'aires sur l'aile Sud</i>	29
<i>Figure 13 : Profil des fondations et de l'élévation de la Tour du Chaudron – coupe réalisée au niveau de la cour (adaptation d'après Bryant et al., 2007)</i>	34
<i>Figure 14 : Localisation des carrières exploitées pour la construction du château de Chambord au XVI^e siècle</i>	37
<i>Figure 15 : Localisation des carrières exploitées pour les restaurations du château au XVII^e siècle</i>	41
<i>Figure 16 : Localisation des carrières exploitées pour les restaurations du château aux XVIII^e et XIX^e siècles</i>	44
<i>Figure 17 : Localisation des carrières exploitées pour les restaurations du château aux XX^e et XXI^e siècles</i>	48
<i>Figure 18 : Localisation des portes murées</i>	52

<i>Figure 19 : Etat des fausses braies à la fin du XVII^e siècle.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 20 : Classification et datation des baies de l'aile Sud.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 21 : Comparaison des emplacements des pilastres de l'aile Sud et du Portail Royal, entre la gravure de Sylvestre (1685) et l'état actuel.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 22 : Photographie des mansardes couvrant l'aile Sud montrant la corniche coupée au droit des fenêtres (non datée - avant 1937)</i>	<i>57</i>
<i>Figure 23 : Représentation de la façade Sud et évolution de la porte latérale gauche.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 24 : Détails de l'aile Sud juste avant la démolition des mansardes et la restauration des corniches en 1937, en comparaison avec des vues actuelles.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 25 : Remplacement des pierres de la corniche au droit des fenêtres en 1937 – Baie n°5 de l'aile Sud.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 26 : Etat de la baie n°16 de l'aile Sud avant et après la restauration de 1955</i>	<i>63</i>
<i>Figure 27 : Comparaison de l'état du Portail Royal en 1947 et en 2012.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 28 : Remplacement d'une pierre sur le jambage de droite du Portail Royal.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 29 : Hypothèse de chronologie de percement des baies de la tour du Chaudron</i>	<i>67</i>
<i>Figure 30 : Morphologie des fenêtres 5, 6 et 9.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 31 : Illustration du percement de la baie n°2, postérieur à la construction des murs de la tour du Chaudron</i>	<i>70</i>
<i>Figure 32 : Les mansardes et les toits terrasses de la tour du Chaudron.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 33 : Dates des différentes reprises des parements de la tour du Chaudron sur la travée contiguë à l'aile Sud</i>	<i>75</i>
<i>Figure 34 : Stylobate des 3^e et 4^e travées de la tour du Chaudron avant et après la restauration de 1999 ...</i>	<i>76</i>
<i>Figure 35 : Soubassement de la 5^e travée de la tour, avant et après restauration.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 36 : Cartographie de la répartition des différentes dates de pose de pierres sur la façade extérieure de l'aile Sud et proportions de chacune de ces dates.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 37 : Cartographie de la répartition des différentes dates de pose de pierres sur la façade extérieure de la tour du Chaudron et proportion de chacune de ces dates</i>	<i>81</i>
<i>Figure 38 : Représentation et pourcentage de surfaces de pierres remplacées sur l'aile Sud et la tour du Chaudron</i>	<i>82</i>
<i>Figure 39 : Représentation et pourcentage des différentes natures de pierres recensées sur l'aile Sud et sur la tour du Chaudron.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 40 : Cartographie de la répartition des différentes natures de pierres sur la façade extérieure de l'aile Sud et proportion de chacune de ces provenances.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 41 : Cartographie de la répartition des différentes provenances de pierres sur la façade extérieure de la tour du Chaudron et proportion de chacune de ces provenances</i>	<i>86</i>

Figure 42 : Carte de localisation des différentes carrières exploitées au cours du temps pour les travaux de construction et de restauration de l'aile Sud.....	87
Figure 43 : Carte de localisation des différentes carrières exploitées au cours du temps pour les travaux de construction et de restauration de la tour du Chaudron.....	88
Figure 44 : Représentation des données environnementales de la tour du Chaudron, en élévation et en plan.	92
Figure 45 : Emplacement des capteurs et de la station météo sur la tour du Chaudron.....	94
Figure 46 : Température mesurée à la surface et à 250 mm de profondeur d'une pierre, selon son exposition au Nord ou au Sud.....	95
Figure 47 : Humidité relative mesurée à la surface et à 250 mm de profondeur d'une pierre, selon son exposition au Nord ou au Sud.....	97
Figure 48 : Variations chromatiques naturelles du tuffeau, parements de l'aile Sud (a). Et variations chromatiques du tuffeau et de la pierre de Richemont entre l'état sec et l'état humide, pierres saines en laboratoire (b).....	98
Figure 49 : Exemple de mousses et de lichens présents sur les façades.....	100
Figure 50 : Exemple d'altérations anthropiques.....	101
Figure 51 : Exemples de parties manquantes et cassures.....	101
Figure 52 : Exemple de fissures sur le côté d'un pilastre.....	102
Figure 53 : Exemples de desquamation en feuillets.....	103
Figure 54 : Exemple de desquamation en plaques sur l'aile Sud.....	104
Figure 55 : Cartographie de répartition des altérations sur la tour du Chaudron.....	107
Figure 56 : Cartographie de répartition des altérations sur l'aile Sud.....	108
Figure 57 : Orientation la plus fréquente des desquamations en feuillets sur les balustres de l'aile Sud.....	110
Figure 58 : Proportion de surface de façade altérée selon chaque type d'altération.....	112
Figure 59 : Gravures réalisées au XIX ^e siècle.....	120
Figure 60 : Photographies de l'aile Sud datant de 1947 (clichés M. Ranjard, 1947).....	125
Figure 61 : Photographies de formes d'altération disparues.....	126
Figure 62 : Travée n°2 de la tour du Chaudron restaurée en 1994. Comparaison des états de 1998 et 2012.....	128
Figure 63 : Desquamation en plaques sur la tour des Princes.....	133
Figure 64 : Desquamation en plaques sur l'aile Sud - façade sur jardin.....	134
Figure 65 : Desquamation en plaques sur l'aile Sud - façade sur cour.....	135
Figure 66 : Illustration des fissures et d'un départ de desquamation en plaques sur le Portail Royal.....	137
Figure 67 : Desquamation en plaques sur la tour du Chaudron.....	138
Figure 68 : Estimation du temps de développement de chacune des altérations recensées.....	142

Figure 69 : Image d'une section polie au microscope électronique à balayage, en mode électrons rétrodiffusés, avec identification des minéraux constitutifs à partir d'analyses élémentaires MEB-EDX ($\times 500$).....	147
Figure 70 : Proposition de séquence de développement, chronologique et spatiale, d'une altération en plaques (d'après Brunet-Imbault, 1999 et Rautureau, 2001)	149
Figure 71 : Cartographies de provenance, de datation, et de l'état d'altération des pierres de la travée n°9.	155
Figure 72 : Localisation des prélèvements par carottage et représentation des différents stades d'altération sur une frise arbitraire du temps	156
Figure 73 : Réseau de fissures de la zone desquamée, observable à droite de la fenêtre.....	156
Figure 74 : Prélèvements par carottages de desquamations en plaques autour de la fenêtre de la travée n°9	157
Figure 75 : Diffractogramme de DRX sur massif à la surface de l'échantillon et à 200 μ m de profondeur	160
Figure 76 : Micrographies MEB de surfaces non polies, en mode électrons rétrodiffusés, représentant la microtexture des échantillons A et C en surface et à cœur.....	161
Figure 77 : Diffractogrammes de DRX obtenus pour l'échantillon B2 de la surface vers la profondeur mettant en évidence la présence du pic caractéristique du gypse situé à 11,6° (2 θ Cu)	163
Figure 78 : Représentation des trois états d'avancement d'une altération en plaques, prélevée sur la tour du Chaudron, avec matérialisation des fissures et répartition en fonction de la profondeur du pourcentage massique de gypse détecté par chromatographie ionique.....	164
Figure 79 : Localisation et morphologie des cristaux de gypse dans la porosité par observation au MEB ..	166
Figure 80 : Cartographie MEB-EDX de répartition des éléments (Si, Ca, S) dans la fissure de l'échantillon B2.....	167
Figure 81 : Cartographie MEB- EDX de répartition des éléments (Si, Ca, S) au niveau de la fissure théorique de l'échantillon B1.....	167
Figure 82 : Localisation sur le plan du rez-de-chaussée du château, des prélèvements réalisés sur l'aile Sud	168
Figure 83 : Localisation sur le plan du premier étage et celui des terrasses du château, des prélèvements complémentaires réalisés.....	169
Figure 84 : Résultats de caractérisation obtenus en diffraction de rayons X et données quantitatives obtenues par chromatographie ionique pour les prélèvements de la zone 8	170
Figure 85 : Localisation des desquamations en feuillets prélevées sur la tour du Chaudron et l'aile Sud....	175
Figure 86 : Localisation des prélèvements de desquamations en feuillets sur le reste du château	176
Figure 87 : Localisation des cristaux de gypse d'une desquamation en feuillets par observation au MEB..	177
Figure 88 : Observation au MEB de cristaux de gypse localisés dans la fissure de l'échantillon B2	194
Figure 89 : Hypothèses de pénétration du gypse dans la pierre	207
Figure 90 : Représentation schématique des trois modes de préparation des échantillons	208
Figure 91 : Protocoles de séchage adoptés	210

Figure 92 : Pourcentage de prise de masse relative de chaque échantillon des cycles 1 à 10	218
Figure 93 : Prélèvement de matière sur les échantillons vus en coupe.....	219
Figure 94 : Représentation des teneurs massiques de gypse contenues dans les échantillons non fissurés lyophilisés après la première imbibition, en comparaison des échantillons ayant subi 10 cycles imbibition/ séchage avec un séchage avec surfaces non-isolées	220
Figure 95 : Pourcentage de prise de masse relative de chaque échantillon imbibés avec le protocole de « marées », des cycles 1 à 10.....	223
Figure 96 : Pourcentage relatif de prise de masse en SO_2 de chaque échantillon des cycles 1 à 10 pour le protocole d'injection de SO_2 suivie d'une imbibition d'eau	223
Figure 97 : Représentation des teneurs massiques de gypse contenues dans les échantillons non pré-fissurés ayant subi 10 cycles avec une solution eau+gypse et comparaison des trois modes d'isolation lors du séchage	225
Figure 98 : Représentation des teneurs massiques de gypse contenues dans les échantillons non pré-fissurés ayant subi 10 cycles avec une solution d' H_2SO_4 et comparaison des trois modes d'isolation lors du séchage.....	226
Figure 99 : Représentation des teneurs massiques de gypse contenues dans les échantillons non fissurés ayant subi 10 cycles avec l'injection de SO_2 et comparaison des trois modes d'isolation lors du séchage.....	227
Figure 100 : Représentation des teneurs massiques de gypse contenues à coeur pour les échantillons ayant subi 10 cycles avec différents polluants : influence de la fissure	228
Figure 101 : Répartition des teneurs de gypse dans les desquamations en plaques prélevées sur site - l'exemple de l'échantillon B2	233
Figure 102 : Répartition relative des teneurs en gypse dans les échantillons vieillis artificiellement en laboratoire, selon le mode d'apport de polluant en soufre après 10 cycles d'imbibition/ séchage	234
Figure 103 : Mécanisme de formation du gypse dans la pierre à partir d'un apport sec de SO_2 gazeux.....	236
Figure 104 : Schéma récapitulatif des différentes étapes de formation de la plaque	238
Figure 105 : Modèle 3D de la tour du Chaudron réalisé par photomodélisation	245
Figure 106 : Sélection d'une entité du modèle 3D, dépliée en 2D	245
Figure 107 : Modèle 3D de la tour du Chaudron réalisé par lasergrammétrie	246
Figure 108 : Combinaison des deux méthodes de modélisation 3D pour améliorer l'étude et l'analyse.....	246
Figure 109 : Combinaison des deux méthodes de modélisation 3D à des fins de valorisation du travail scientifique	247
Figure 110 : Présentation de l'interface de NUBES.....	249
Figure 111 : Calque de base – la matrice.....	250
Figure 112 : Calques de représentation des données.....	251

ANNEXES

Annexe 1 : Lexique des termes architecturaux employés

Annexe 2 : Les sources

2.1. Liste des sources écrites

2.2. Liste des sources iconographiques

Annexe 3 : Les carrières exploitées

3.1. Tableau récapitulatif des carrières exploitées pour la construction et les restaurations de Chambord depuis le XVI^e siècle

3.2. Tableau des caractéristiques des principales natures de pierres employées sur les parties étudiées

Annexe 4 : Cartographies de l'aile Sud et de la tour du Chaudron

4.1. Cartographies de datation des pierres

4.2. Cartographies provenance des pierres

4.3. Cartographies d'altérations

Annexe 5 : Vérifications complémentaires en Diffraction de Rayons X

Annexe 4 : Protocole de chromatographie ionique

ANNEXE 1 : LEXIQUE DES TERMES ARCHITECTURAUX EMPLOYÉS

Allège : n. f. Petit mur construit dans la partie inférieure d'une baie de fenêtre, pour servir de garde-fou et porter l'appui

Assise : n. f. Rang de pierres de taille que l'on pose horizontalement pour construire une muraille

Astragale : n. m. Moulure séparant le fût et le chapiteau d'une colonne ou d'un pilastre

Baie : n. f. Ouverture pratiquée dans un mur pour servir de porte ou de fenêtre

Balustrade : n. f. Assemblage de plusieurs balustres servant d'ornement ou de clôture

Balustre : n. m. Sorte de petit pilier façonné

Blocage : n. m. massif de pierraille et de mortier qui remplit les vides entre les parements d'un mur

Boutisse : n. f. Pierre taillée que l'on place dans un mur suivant sa longueur, de manière à ne montrer qu'un de ses bouts

Carreau et boutisse : alternance de la face la plus petite de la pierre taillée (boutisse), avec celle la plus grande (carreau)

Chapiteau : n. m. Partie du haut de la colonne, souvent ornée, sur laquelle est posée la frise et qui repose sur le fût

Cimaise : n. f. Moulure qui forme la partie supérieure d'une corniche

Claveau : n. m. Pierre taillée en coin (en biseau), qui entre dans la construction des voûtes plates ou carrées, des linteaux dans les portes, fenêtres, etc.

Corniche : n. f. Ornement composé de moulures en saillie l'une au-dessus de l'autre. La corniche sert de couronnement à toute sorte d'ouvrages, principalement dans les ordres d'architecture, où elle est placée sur la frise de l'entablement

Croisée : n. f. Châssis d'une fenêtre, généralement en forme de croix, divisé ou non par un montant et par une ou plusieurs traverses et garni de vitres

Ebrasement : n. m. Biais des côtés de l'embrasure d'une baie, destiné à faciliter l'ouverture et l'accès de la lumière

Entablement : n. m. Le dernier rang de pierres qui est au haut d'un bâtiment, et sur lequel pose la charpente de la toiture. Il se dit plus spécialement de cette partie de certains édifices qui surmonte ordinairement des colonnes ou des pilastres, et qui comprend l'architrave, la frise et la corniche

Fausse-braie : n. f. Terre-plein ou mur de soutènement entourant un camp fortifié. Ici, caractérise le mur de soutènement qui surplombe le Cosson et longe les parties Nord du château

Jambage : n. m. Partie latérale d'une baie – murs ou piliers qui supportent une voûte ou un arc

Synonyme : piédroit

Linteau : n. m. Pièce de construction posée en travers au-dessus d'une baie pour soutenir la maçonnerie

Synonyme : platebande

Main courante : n. f. Partie d'un garde-corps sur laquelle on pose la main

Meneau : n. m. Montant ou traverse de bois, de pierre ou de fer qui partage l'ouverture d'une croisée

Modillon : n. m. Ornement propre aux ordres ionique, corinthien et composite, placé sous le larmier de la corniche et figurant l'extrémité des chevrons du comble

Moulure : n. f. Nom générique de chacune des parties plus ou moins saillantes, droites ou courbes qui servent d'ornement courant dans un ouvrage d'architecture

Mur gouttereau : n. m. Mur de façade reliant les murs pignons

Mur pignon : n. m. Mur qui s'élève jusqu'au-dessous du toit, le supporte et en a le profil

Mur de refend : n. m. Mur que l'on élève entre les gros murs, pour diviser l'intérieur du bâtiment

Parement : n. m. Surface apparente d'un mur

Piédroit : n. m. Partie latérale d'une baie – murs ou piliers qui supportent une voûte ou un arc

Synonyme : jambage

Pilastre : n. m. Pilier carré, auquel on donne les mêmes proportions et les mêmes ornements qu'aux colonnes et qui ordinairement est engagé dans un mur

Platebande : n. f. Pierre qui sert de linteau à une porte, à une fenêtre, ou l'assemblage de claveaux qui tient lieu d'une seule pierre

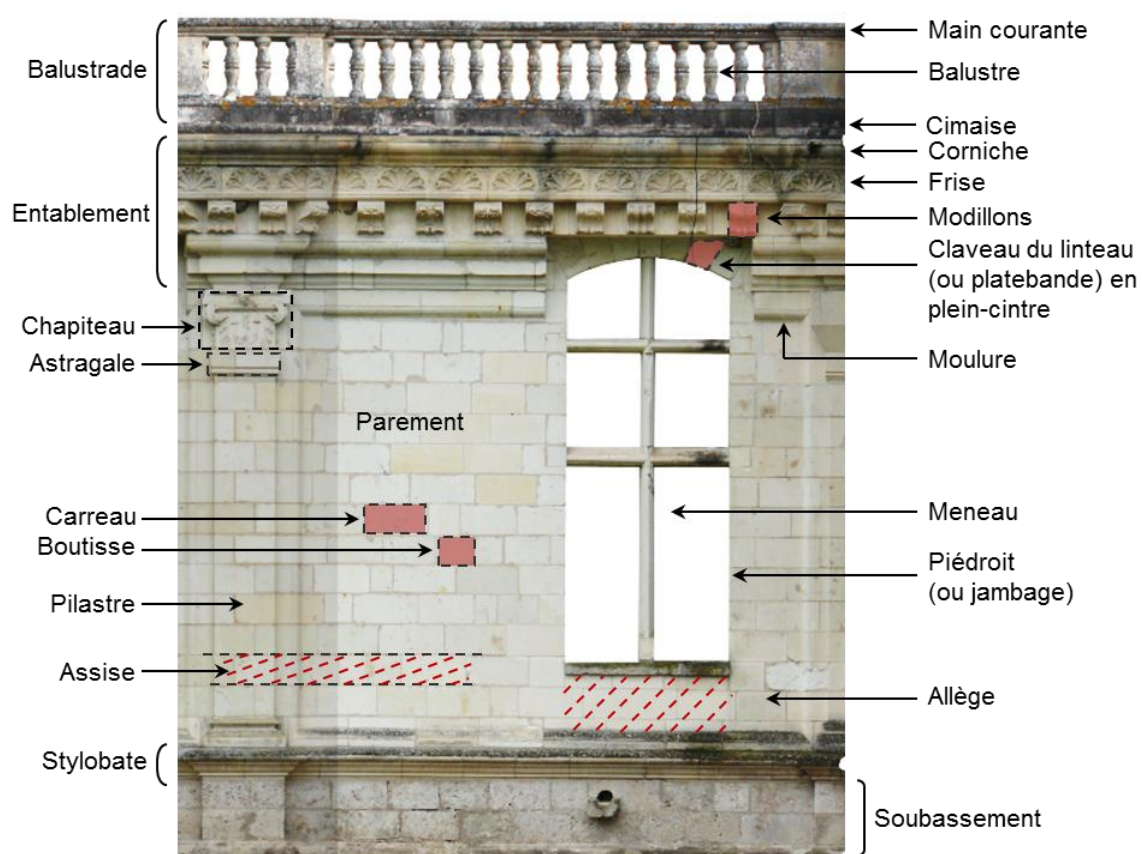
Synonyme : linteau

Plein-cintre : n. m. Arc de forme semi-circulaire

Soubassement : n. m. Partie inférieure d'une construction sur laquelle porte l'édifice et qui porte elle-même sur les fondations

Stylobate : n. m. Piédestal, soubassement qui porte des colonnes

Travée : n. f. Partie de l'élévation comprise, entre deux piliers, deux colonnes



ANNEXE 2 : LES SOURCES

Nomenclature

AN : Archives Nationales, Paris

BN : Bibliothèque Nationale, Paris

MAP : Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Charenton-le-Pont (94)

AD 41 : Archives Départementales du Loir-et-Cher (41)

AD 45 : Archives Départementales du Loiret (45)

DRAC : Direction Régionale des Affaires Culturelles, Région Centre, Orléans (45)

BM 45 : Bibliothèque Municipale d'Orléans (45)

2.1. LISTE DES SOURCES ÉCRITES

Ce document contient tous les textes consultés qui font référence aux parties étudiées ou apportent des éléments nécessaires au diagnostic. Une copie numérique de chacun de ces textes a été faite afin d'enregistrer chaque source de manière exhaustive dans la base de données NUBES, carnet de santé numérique du château.

Les textes publiés ne sont pas recensés ici, mais répertoriés dans la liste des références bibliographiques.

En rouge figurent les documents cités dans le corps de ce manuscrit.

Cotes	Date	Auteur	Titre
ARCHIVES DÉPARTEMENTALES 41			
<i>Devis de travaux de restaurations</i>			
37 Q 2 Travaux	1830-1841		Travaux de maçonnerie, charpente, couverture, serrurerie, plâtrerie, peinture, plomberie, sculpture, terrassement, fourniture, au château, maisons du village et murs du parc Dépouillement fait par C. Langlois
37 Q 3 Travaux	1842-1847		
37 Q 4 Travaux	1848-1852		
37 Q 5 Travaux	1853-1858		
37 Q 6 Travaux	1860-1865		
37 Q 7 Travaux	1866-1873		
37 Q 8 Travaux	1874-1882		
37 Q 9 Travaux	1883-1886		
37 Q 10 Travaux	1887-1888		
37 Q 11 Travaux	1889-1890		
37 Q 12 Travaux	1891-1893		
37 Q 13 Travaux	1894-1895		
37 Q 14 Travaux	1896-1897		
37 Q 15 Travaux	1898		
37 Q 16 Travaux	1899-1900		

37 Q 17 Travaux	1902-1904		
37 Q 18 Travaux	1905-1906		
37 Q 19 Travaux	1907-1909		
37 Q 20 Travaux	1910-1913		
37 Q 21 Travaux	1914-1918		
37 Q 22 Travaux	1919-1930		
165/188	1945-1950		Démolition des mansardes de l'aile des Princes et de la tour des Princes – devis établis par l'architecte M. Pinault et lettre et consignes du régisseur M. Bourcier

<i>Fonds Robert-Houdin</i>			
127 J 37	1931-1961		Chambord, inventaire et conservation - gros entretien - inventaire mobilier et matériel d'entretien
127 J 40	1925-1944		Correspondance des Monuments Historiques
127 J 41	1939-1947		Travaux et aménagements
127 J 43	1955-1962		Travaux et aménagements
127 J 47	1955-57		Travaux et aménagements

<i>Actes notariés</i>			
3 E 27/280	1641, 1er mai	Me Lavie	Devis de travaux de maçonnerie aux 8 grosses tours du château de Chambord
3 E 8/118	1642, 12 décembre	Me Goussu	Contrat d'association entre Arnould de la Haye et divers ouvriers pour les travaux du château et du parc de Chambord
3 E 8/262	1681, 3 février	Me Goussu	"Devis des ouvrages de maçonnerie, charpenterie, couverture, pavé, fouille et transport de terre pour la construction des écuries à faire pour le Roy au château de Chambord"
3 E 35/338	1683, 29 janvier et 20 février 1685		Divers marchés passés avec l'entrepreneur des bâtiments du roi (Martin-Demézi, 1986)
3 E 35/342	1701, 25 novembre	Me Cail	Devis de travaux de maçonnerie faits aux établissements et aux murs du domaine de Chambord
3 E 35/344	1706, 12 février	Me Cail	Devis d'entretien de maçonneries à faire pour le Roy en son château de Chambord
3 E 35/345	1707, 19 janvier	Me Cail	Devis d'entretien de maçonneries à faire pour le Roy en son château de Chambord
3 E 35/349	1715, 14 juin	Me Cail	Devis d'entretien de maçonneries à faire pour le Roy en son château de Chambord
3 E 35/352	1720, 13 janvier	Me Cail	Devis d'entretien de maçonneries à faire pour le Roy en son château de Chambord
3 E 35/354	1724, 28 février	Me Cail	Devis de maçonnerie à faire au château de Chambord
3 E 35/355	1727, 29 décembre	Me Cail	Devis de maçonnerie à faire au château de Chambord
2 A 7	1786, 24 juin		Mémoire d'ouvrage et fourniture de charpente faites au château de Chambord, ordonné par M. le Marquis de Polignac - Pour le Sieur Marie
3 E 10/3102	1831, 15 mai	Me Martel	adjudication de matériaux de Chambord - vente de matériaux provenant de démolitions au château de Chambord (charpentes)

ARCHIVES DEPARTEMENTALES 45			
1339 W 555	1964-1977		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
1339 W 563	1971-1978		Aménagement et restauration Communs d'Orléans
1339 W 564	1972-1985		Aménagement et restauration Communs d'Orléans
1339 W 566	1969-1989		Rapport d'entretien Aile Sud et Tour du Chaudron
1339 W 567	1972-1982		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
1339 W 571	1975-1986		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
1339 W 572	1983-1988		Aménagement et restauration Tour du Chaudron
1339 W 573	1976-1977		Aménagements et travaux d'entretien Aile Sud
1339 W 578	1977-1985		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
1339 W 579	1978-1984		Aménagement et restauration Aile Sud, Tour du Chaudron
1339 W 581	1980-1986		Aménagement et restauration Aile Sud

MEDIATHEQUE DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE			
0081/041/0115/02	1941-1955		Incidents château et abords
0081/041/0115/05	1973-1978		Restauration des communs
0081/041/0115/06	1886-1935		Aménagement et restauration Tour du Chaudron
0081/041/0115/07	1936-1943		Restauration des terrasses de l'Aile Sud
0081/041/0115/08	1938		Restauration des terrasses de l'Aile Sud
0081/041/0115/12	1948-1950		Restauration de la tour des Princes
0081/041/0115/15	1953		Restauration Aile Sud
0081/041/0115/16	1955-1956		Restauration Aile Sud et Portail Royal
0081/041/0115/25	1959-1963		Restauration partie gauche Aile Sud
0081/041/0115/26	1964-1967		Restauration partie droite Aile Sud et Tour du Chaudron/Documents disparus
0081/041/0115/29	1979-1987		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
0081/041/0115/33	1988-1994		Aménagement et restauration Aile Sud, Tour du Chaudron
1989/12/7	nd		Travaux des douves du Cosson
1989/12/8	1953		Aménagement Aile Sud
1989/12/9	1972-1973		Travaux communs d'Orléans et Tour du Chaudron

DIRECTION REGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES – REGION CENTRE			
DRAC –T4	1992-1995		Strict entretien Aile Sud et Ecuries du Maréchal de Saxe
DRAC –T5	1994		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron
DRAC –T10	1994		Aménagement et restauration Aile Sud et Tour du Chaudron

ARCHIVES NATIONALES			
O ¹ -1325, liasse 1, pièce 45	1684		Devis des ouvrages de maçonnerie qu'il convient de faire au château de Chambord, pour la construction de l'avant-cour que le roi a ordonné d'y faire, suivant les plans, élévations et profils qui en ont été faits par Mansart, premier architecte de sa majesté Conservé dans les "Recueils des devis des bâtiments du roi de l'année 1684"

2.2. LISTE DES SOURCES ICONOGRAPHIQUES

Ce document ne contient que sources iconographiques relatives aux parties étudiées qui ont pu être consultées dans les différents centres d'archives. En revanche les gravures de plans et élévations cités dans l'étude et par ailleurs connus dans la littérature n'ont pas été répertoriées dans ce tableau.

De même que pour les archives manuscrites, il existe une copie numérique de chacune de ces sources iconographiques, enregistrées dans la base de données NUBES et associées à une localisation précise sur le modèle 3D de la façade lorsqu'il s'agit d'illustration de détails. En rouge figurent les documents cités dans le corps de ce manuscrit.

Cote	Description	Date	Dimension	Technique
ARCHIVES DEPARTEMENTALES DU LOIR-ET-CHER (41)				
<i><u>Plans du XIX^e siècle</u></i>				
58 Fi 393	Plan des Communs		55x45	Encre sur calque
58 Fi 395	Plan du RDC		60x97	Encre et lavis sur calque
58 Fi 400	Bâtiment des communs, logement du secrétaire, entresol et RDC	1887	35x45	Encre sur calque
58 Fi 402	Coupe sur la tour Sud, coupe sur l'aile des communs (mansardés), coupe sur les communs en face sur la place d'armes, ech. 1/100		39,5x30,5	Encre et lavis sur calque
58 Fi 403	Elévation développée des communs		98x64	Mine de plomb sur papier
58 Fi 409	Elévation de la Porte Royale		93x60	Encre sur calque
58 Fi 410	Projet pour la Porte Royale, par Desbois , plan, coupe, élévation	1902	96x60	Encre sur calque
58 Fi 411	Projet pour la Porte Royale, par Desbois , plan, coupe, élévation	1902	106x75	Encre et lavis sur papier
58 Fi 412	Projet pour la Porte Royale, par Desbois		105,5x61	Encre sur papier
58 Fi 413	Projet pour la Porte Royale, par Desbois		66x102	Encre, lavis et mine de plomb sur papier
58 Fi 414	Elévation de la Porte Royale (autre version)		104x66,5	Encre sur papier
58 Fi 417	Elévation, plan et coupe de la balustrade des communs		95x61	Encre et lavis sur papier
58 Fi 422	Coupe schématique sur les communs		100x69	Encre et lavis sur papier
58 Fi 428	Dossier d'étude de la balustrade côté Porte Royale		103x64,5	Encre sur papier
58 Fi 432	Plan partiel à RDC avec modifications entre la cours du château et la place d'Armes		43,5x29	Encre et lavis sur calque
58 Fi 437	Relevé à 1/50 d'une travée de baie		52,5x75	Encre sur papier
58 Fi 438	Coupe de détail sur la charpente métallique de la terrasse par Desbois	1886	63x41	Encre et lavis sur calque
58 Fi 439	Croquis d'élévation de la Porte Royale à percer		69x49	Encre, mine de plomb et lavis sur calque
58 Fi 440	Relevé de piédestaux		65,5x20	Encre sur papier
58 Fi 441	Croquis pour la balustrade des tours des communs		20x19	Mine de plomb sur papier
58 Fi 444	Elévation des communs		98,5x31,5	Encre sur papier
58 Fi 452	"Feuille à conserver : plan de la balustrade côté place		52x33	Mine de plomb sur papier

	d'Armes/ coté cour" + une feuille épinglée ; relevé côté			
58 Fi 460	Plan des communs au RDC et entresols		37x48	Encre sur calque
58 Fi 462	Tour des Princes et aile de l'entrée		99x30	Encre et lavis sur calque
58 Fi 465	Tour de Sedaine et aile de l'entrée (moitié de l'aile de l'entrée)		77x53	Encre sur calque
58 Fi 467	Tour de Sedaine et aile de l'entrée		86x31	Encre et lavis sur calque
58 Fi 468	Plan partiel des communs RDC, entresol et coupe, éch. 1/100		34,5x48,5	Encre et lavis sur calque
58 Fi 469	Elévation de la balustrade		70x34	Mine de plomb sur papier
58 Fi 470	Coupe sur la balustrade		18x26	Mine de plomb sur calque

Plan du XX^e siècle : Fonds Robert-Houdin

176 FiV 9	Aile Sud et tours – RDC et entresols			-
	Tour du chaudron, RDC et entresols			-
176 FiV 10	Plan du château : logement des agents			Encre sur papier
	Plan aile Sud – ouvertures sur façade			Crayon sur papier
	Plan aile Sud			Encre sur papier
	Dessin élévation Porte Royale			Crayon sur papier
	Photogrammétrie Face Sud			Crayon sur calque
	Coupe façade Sud - logement du concierge			Crayon sur papier
	Plan Tour du Chaudron – 1er étage			Crayon sur papier + crayon rouge
	Plan Tour du Chaudron – 1er étage			Encre sur papier
176 FiV 11	Plan du château			Encre sur calque
	Elévation façade Aile sud			Dessin sur papier

Cartes postales du XX^e siècle

6 Fi 034/19	Façade Méridionale			Cartes postales
6 Fi 034/22	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/27	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/31	Le château construit pour François 1 ^{er} de 1519 à 1535			Cartes postales
6 Fi 034/33	Façade Méridionale			Cartes postales
6 Fi 034/41	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/44	Façade Sud		Autour de 1900	Cartes postales
6 Fi 034/59	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/60	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/85	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/122	Façade Sud-Est			Cartes postales
6 Fi 034/135	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/239	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/257	Façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/301	Façade Méridionale			Cartes postales
6 Fi 034/353	Façade Méridionale			Cartes postales
6 Fi 034/380	Le château (XVI ^e), vue d'ensemble façade Sud			Cartes postales
6 Fi 034/411	Entrée du parterre du roi de Pologne			Cartes postales
6 Fi 034/444	Entrée du parterre du roi de Pologne			Cartes postales

MEDIATHEQUE DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE				
<u>Photothèque</u>				
<i>Chemise 84-41-1007</i>				
-	Aile Sud, Chapiteau 16			Photographie
-	Aile Sud, Chapiteau 19			Photographie
-	Aile Sud, Chapiteau 20			Photographie
-	Aile Sud, Chapiteau 21			Photographie
cl. 21 149	Façade Sud			Photographie
cl. 95 339	Façade Sud	1937		Photographie
cl. 114 713	Façade Sud			Photographie
cl. 114 714	Façade Sud			Photographie
cl. 83070	Façade Sud			Photographie
cl 21 150	Façade Sud			Photographie
cl. 95339	Façade Sud avant la suppression des mansardes			Photographie
APMH00007499	Façade Sud	1851	Le Gray	Photographie
BRB00166	Façade Sud	1856	de Brébisson	Photographie
<i>Chemise 14 : Village, extérieur du château</i>				
cl. 72 P 361	Façade Sud			Photographie
cl. 143 000	Tour du Chaudron			Photographie
cl. 145 457	Façade Sud			Photographie
cl. 145 462	Portail Royal	1947		Photographie
cl. 145 463	Chapiteaux de gauche du Portail Royal	1947		Photographie
<u>Archives</u>				
<i>Dessins des devis de restauration</i>				
0081-041-0115-07	Démolition de la charpente de l'aile Sud, remplacement de pierres sur la corniche	1936		Encre sur papier
	Remplacement des pierres de l'entablement de la partie à droite de la Porte Royale	1937		Encre sur papier
	Remplacement des pierres de l'entablement de la partie à gauche de la Porte Royale	1937		Encre sur papier
<i>Photographies associées aux devis de restauration</i>				
0081-041-0115-07	Aile Sud, Chapiteaux 10 et 11	Vers 1930		Photographie
	Aile Sud avant démolition des mansardes	Vers 1930		Photographie
Archives Ranjard, photographies extraites de plusieurs dossiers, principalement 0081-041-0115-25 et 26	Baies n°16 : fuite avant restauration de 1955	Vers 1947	Ranjard	Photographies diverses
	Portail Royal : fuite	Vers 1947	Ranjard	Photographie diverses
	Escalier de la chapelle et arcades de la galerie attenante	Vers 1947	Ranjard	Photographie diverses
	Tour des Princes avant les restaurations des années 1950	Vers 1947	Ranjard	Photographie diverses

ANNEXE 3 : LES CARRIÈRES EXPLOITÉES

3.1. TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CARRIÈRES EXPLOITÉES POUR LA CONSTRUCTION ET LES RESTAURATIONS DE CHAMBORD DEPUIS LE XVI^E SIÈCLE

Les pierres suivies d'un astérisque sont celles dont l'emploi n'est pas attesté par les textes, mais uniquement évoqué en déduction

En rouge figurent les pierres employées pour l'aile Sud et la tour du Chaudron.

Période de construction	Nom des pierres	Nature	Localisation dans la construction	Sources bibliographiques
Travaux sous François I ^{er} XVI ^e siècle	Pierre de Chilly (Cheillé)	Tuffeau	Marches et Perrons	Mussat, 1991 Chatenet, 2002
	Roche de Fouchault		Parement de murs	
	Pierre de Belleruche			
	Pierre de Saint-Aignan			
	Pierre de Bourré			
	Pierre de Lye			
	Huisseau-sur-Cosson *	Calcaire lacustre	Soubassements	Mussat, 1991
	Huisseau- sur-Mauves *			Mussat, 1991
	Chisseaux *			D'après les matériaux employés à Chenonceau (travaux réalisés par P. Delorme en 1557)
	Francueil *			
Travaux sous Louis XIV XVII ^e siècle	Pierre d'Apremont-sur-Allier	Calcaire jurassique	Chapiteaux, corniches et marche d'escalier	AD 41 : minutier Chambord 35E338
	Pierre de Bourré	Tuffeau	Parement de murs	J. Hardouin-Mansart, sd, AN : O1-13245, liasse 1, pièce n°45
	Pierre de Vineuil			
	Pierre de Marnay		Cimaies	
	Pierre de Belleruche		Croisées des fenêtres (meneaux)	
	Pierre de Menard	Calcaire lacustre	Soubassements, seuil des portes	

Travaux des XVIII ^e et XIX ^e siècles	Banc royal de Saint-Maximin	Calcaire éocène	Entablements, balustrades	AD 41, 37 Q 8, 1876
	Pierre de Vitré	Tuffeau	Corniches, entablements	AD 41 37 Q 4 1851 AD 37 Q 5 1856
	Pierre de St-Aignan		Croisées des fenêtres parements	AD 41, 37 Q 3, 1848
	Pierre de Belleroche			AD 41, 37 Q 4, 1850 AD 41, 37 Q 15, 1898
	Pierre de Bois-Minhy		Parements	AD 41, 37 Q 6, 1864
	Pierre de Villentrois			AD 41, 37 Q 15, 1898
	Pierre de Tercé	Calcaire jurassique	Socle, balustrades, pilastres, mains courantes	AD 37 Q 18 1905
	Pierre de Chauvigny		Appui des fenêtres, parements et moulures	AD 41, 37 Q 4, 1851
	Pierre de Pontijou	Calcaire lacustre	Soubassements, seuil des portes	AD 37 Q 17 1904
Travaux du XX ^e siècle	Pierre de Saint-Cyr-en-Bourg	Tuffeau	Parements intérieurs	MAP, 0081/041/0115/25, 1975, 1339 W 564
	Pierre du Bois-Minhy		Parements	AD 41, Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre de mars 1947, de Michel Ranjard à Paul Robert-Houdin
	Pierre de Villentrois			AD 41, Fonds Robert-Houdin, 127 J 41, lettre du 2 juin 1947, de Michel Ranjard à Paul Robert-Houdin
	Pierre de Loches			
	Pierre de Richemont	Calcaire crétacé supérieur	Couronnement des murs, parements	MAP, 0081/041/0115/25, 1963
	Pierre de Salamandre, carrières de Saint-		Couronnement des murs	AD 41 Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 10 septembre 1947
	Pierre de Tervoux		Balustrades, socles, mains courantes	AD 41 Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 17 octobre de Maurice Lotte à Paul Robert-Houdin et 127 J 41, note datée du 27 août 1939
	Pierre de Lavoux	Calcaire jurassique	Couronnement des murs	AD 41 Fonds Robert-Houdin, 127 J 40, lettre du 10 septembre 1947
	Pierre de Tercé		Balustrades, socles	AD 41 : Fonds Robert-Houdin 127J41
	Pierre de Chauvigny		Couronnement des murs, balustrades, socles	AD 45 : doc DRAC 1339 W 564
	Pierre de Pontijou	Calcaire lacustre	Soubassements	DRAC – CRMH, documents Chambord T5, devis due l'entreprise Lefèvre en 1994
	Pierre de Berchères			MAP, 0081/041/0115/25, 1963
	Pierre de Pontlevoy			Restaurations 2012, non archivées

3.2. TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPALES NATURES DE PIERRES EMPLOYÉES SUR LES PARTIES ÉTUDIÉES

	Tuffeau	Pierre de Richemont	Calcaire de Beauce	Pierre d'Apremont-sur-Allier
Caractérisation	Clément <i>et al.</i> , 1990 Dessandier, 1995 Beck, 2006	Derbez, 1999 Birginie <i>et al.</i> , 2000 Dessandier, 2000	Yvard, 1976 Lorain, 1973	Gorget, 1990 Lorenz, 1991 Brunet-Imbault, 1999
Age géologique	Turonien	Bajocien	Oligocène	Bajocien
Couleur	Blanc-beige clair	Beige clair	Blanc-gris	Blanc-beige clair
Composition minéralogique	<i>Calcaire siliceux</i> calcite (50%) sphérules d'opale CT (30%), quartz (10%), minéraux argileux (10%)	<i>Calcaire oolitique</i> calcite (97%), quartz (1%), minéraux argileux (2%)	<i>Calcaire lacustre</i> calcite (95%) quartz (5%)	<i>Calcaire micritique</i> calcite (75%), quartz (25%),
Résistance en compression	10 MPa	15 MPa	80 MPa	25 MPa
Masse volumique apparente	1.3 g/cm ³	2.0 g/cm ³	2.5 g/cm ³	2.1 g/cm ³
Porosité	40-45%	25%	10%	20%
Perméabilité	10 ⁻¹³ m ²	10 ⁻¹⁴ m ²	n/a.	n/a.

ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIES DE L'AILE SUD ET DE LA TOUR DU CHAUDRON

4.1. CARTOGRAPHIES DE DATATION DES PIERRES

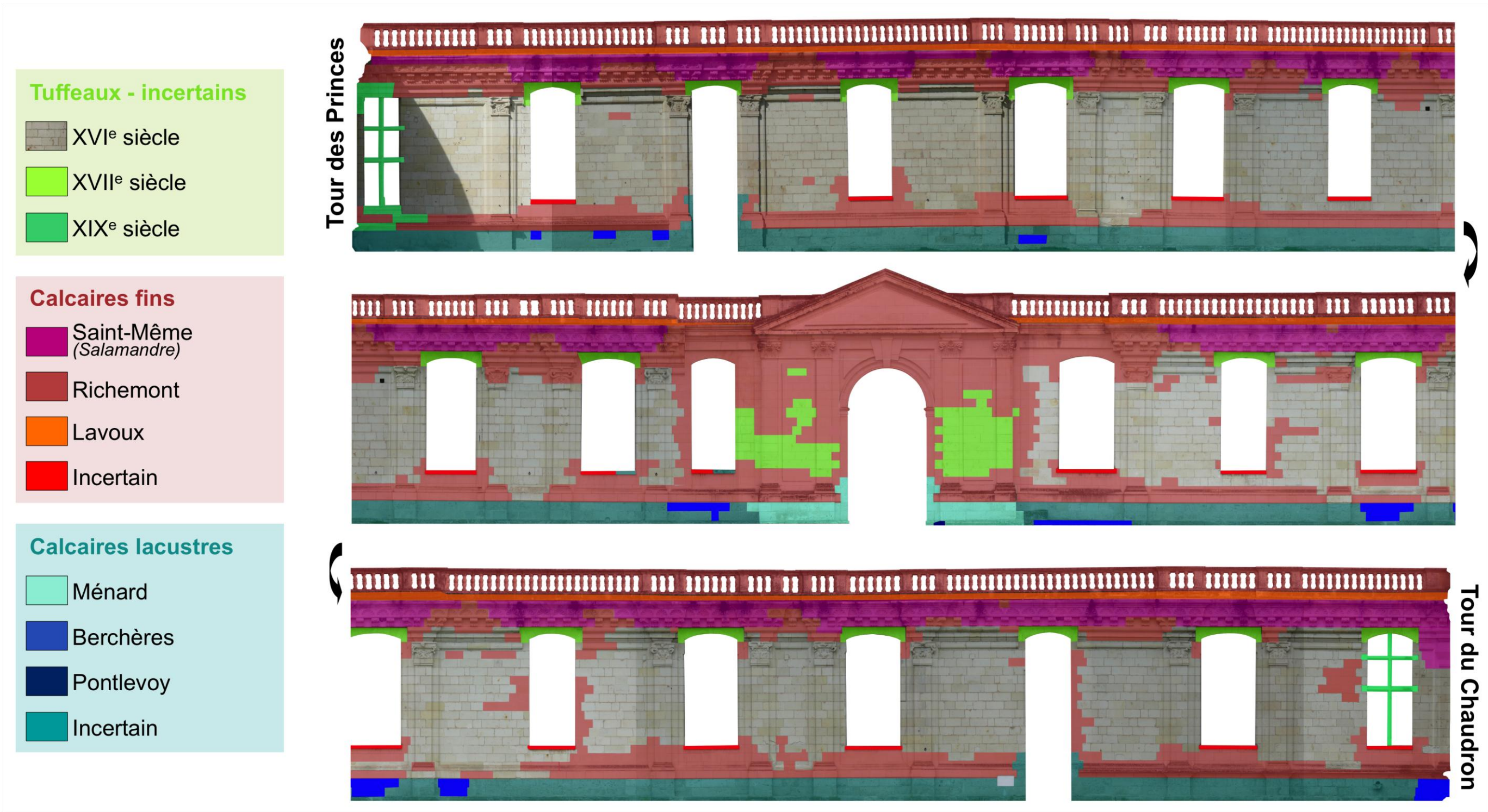
AILE SUD



TOUR DU CHAUDRON

4.2. CARTOGRAPHIES DE PROVENANCE DES PIERRES

AILE SUD

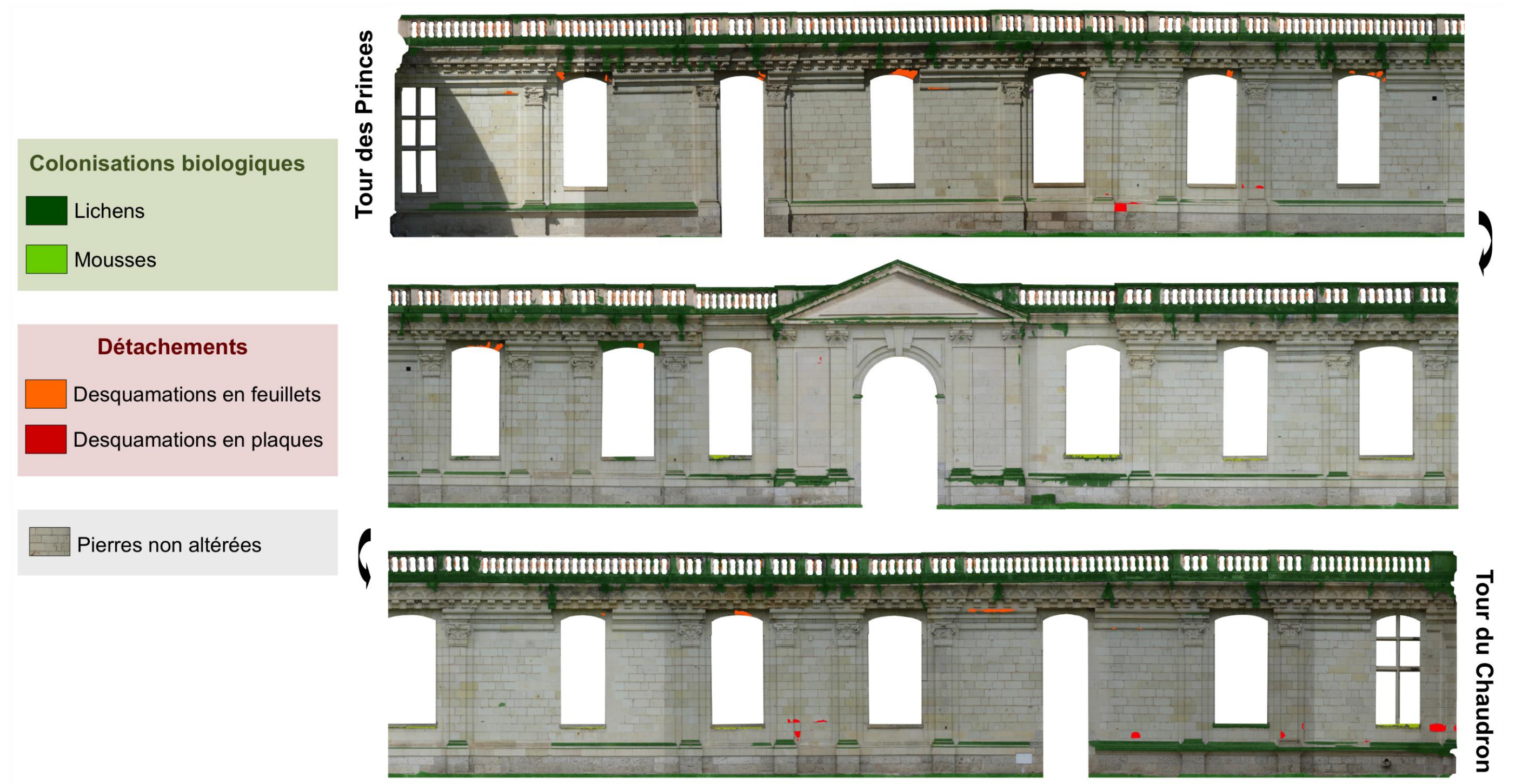


TOUR DU CHAUDRON



4.3. CARTOGRAPHIES D'ALTÉRATIONS

AILE SUD



TOUR DU CHAUDRON

Colonisations biologiques

Lichens

Mousses

Détachements

Desquamations en feuillets

Desquamations en plaques

Cassures

Pierres non altérées

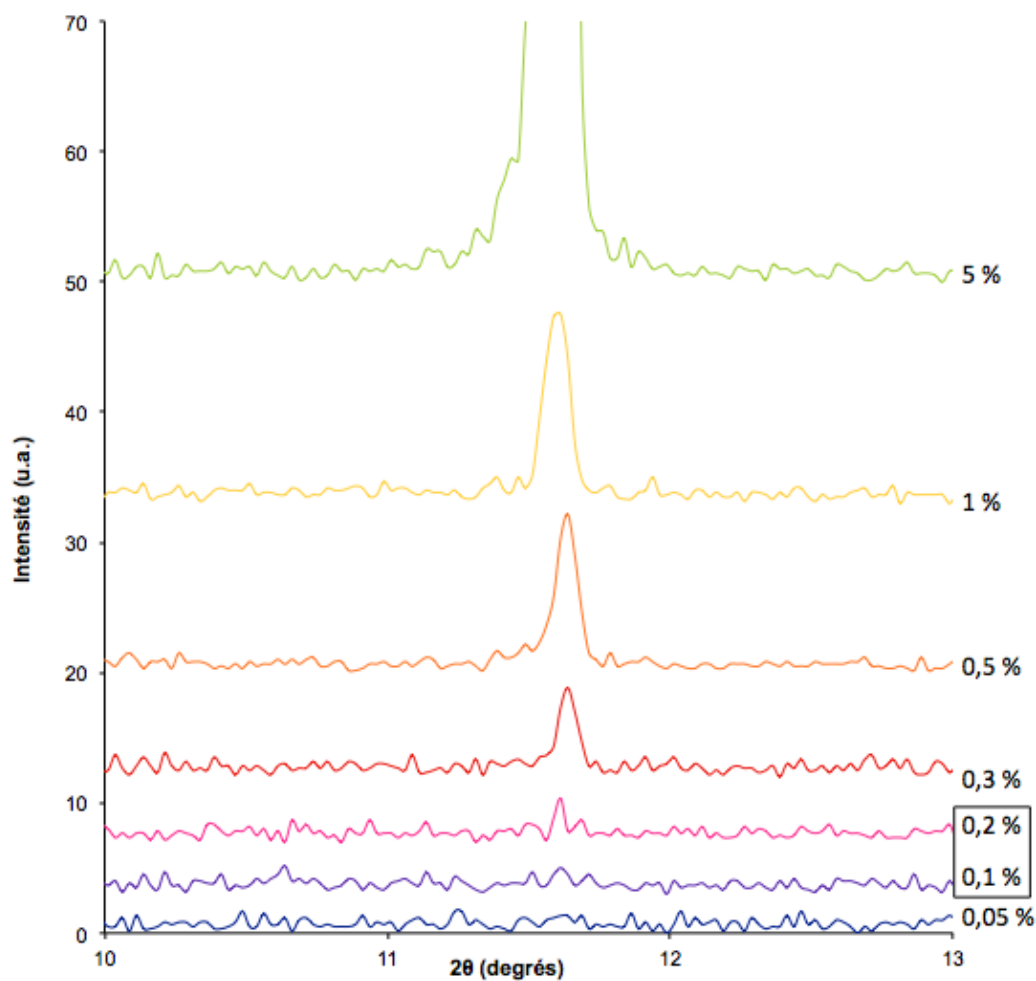


ANNEXE 5 : VÉRIFICATIONS COMPLÉMENTAIRES EN DIFFRACTION DE RAYONS X

Seuil de détection de la Diffraction de Rayons X du pourcentage massique de gypse dans un mélange calcite/quartz/gypse

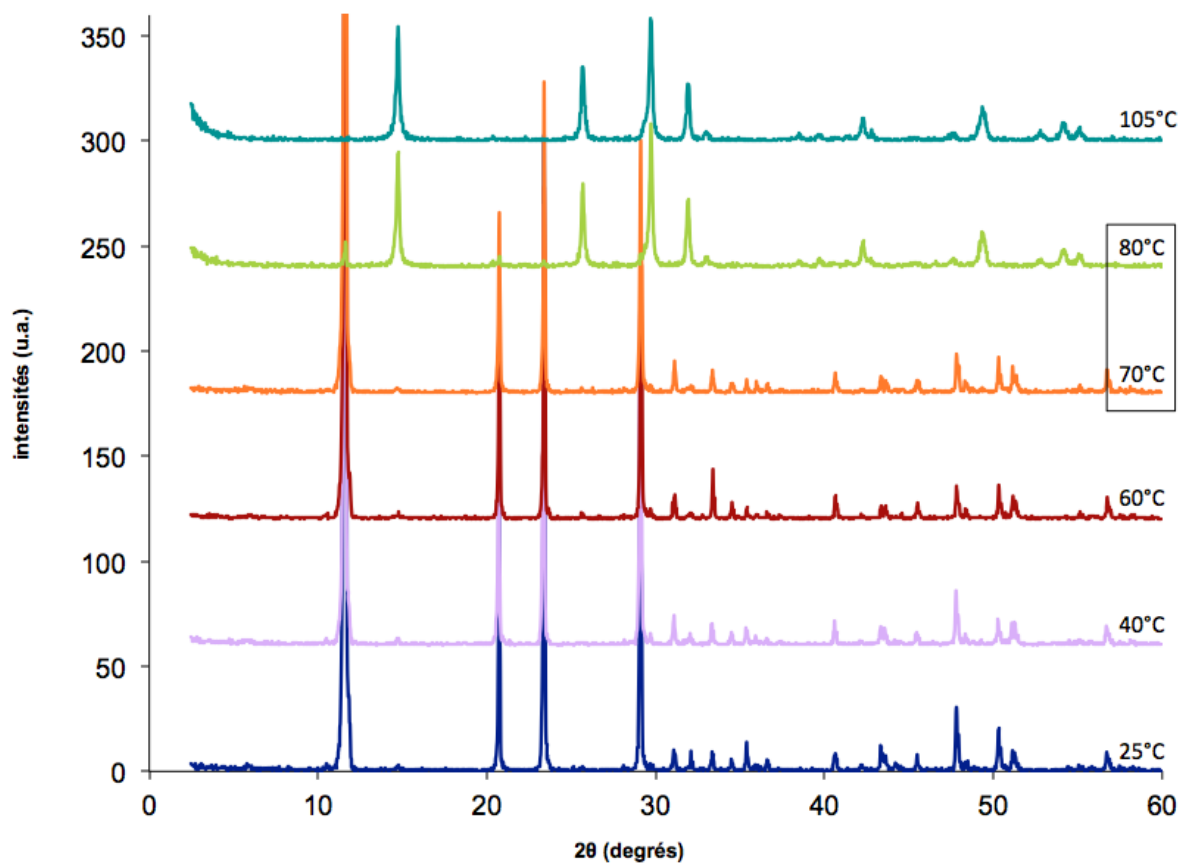
Ce seuil se situe entre 0,1 et 0,2 % massique de gypse dans le cas de cristaux de gypse bien cristallisés.

Les pourcentages des mélanges ont été vérifiés par mesure des sulfates en chromatographie ionique, puis calcul du pourcentage massique de gypse.



Évaluation de la température limite de l'étuve de conservation ou de séchage de l'échantillon, à laquelle le gypse se transforme en bassanite

Cette limite se situe entre 70°C et 80°C où les premiers cristaux de Bassanite apparaissent. La température choisie pour le séchage des échantillons (40°C) est bien en-deçà de tout risque de transformation des cristaux.



ANNEXE 6 : PROTOCOLE DE CHROMATOGRAPHIE IONIQUE

Le protocole de préparation des échantillons de chromatographie ionique est celui communément utilisé dans le cadre de l'analyse d'échantillons de pierres pour la conservation-restauration du patrimoine. Il s'agit de la norme NORMAL 13/83 *Dosaggio dei sali solubili*, établie en Italie en 1983. C'est également ce protocole qui est utilisé par le LRMH, et décrit dans la thèse d'E. Colas (2011).

Les échantillons sont réduits en poudre et mis à sécher durant plusieurs jours dans une étuve ne dépassant pas les 40°C, jusqu'à stabilisation de la masse. Pour chaque échantillon, 200 mg de matière est nécessaire, diluée dans de l'eau ultrapure (Système MilliQ, Direct Q3, Millipore) jusqu'à une concentration de 1g/100 mL. L'échantillon est ensuite mis à agiter durant 72 heures dans une pièce aux conditions de température stables. L'objectif est d'extraire les sels solubles contenus dans la pierre.

Les échantillons sont ensuite filtrés avec une seringue à usage unique et un filtre éliminant les particules de taille supérieure à 45 µm (membrane PES, 25 mm).

Les cations Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , et les anions Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- ont été analysés. À partir des dosages obtenus en mg/L, il a été possible de calculer le pourcentage massique de sulfates, auquel correspond un pourcentage massique de gypse. Ces calculs ne sont possibles qu'une fois que l'on s'est assuré par Diffraction de Rayons X que tous les sulfates présents dans l'échantillon sont attribuables au gypse.

Sarah JANVIER-BADOSA

**Le carnet de santé d'un monument
Application au château de Chambord**

Résumé :

Ce travail de thèse consiste en l'élaboration d'une méthodologie d'étude de monuments historiques, appliquée au château de Chambord. Il s'agit de mettre en place le carnet de santé de l'édifice, et de le compléter par une expérimentation en laboratoire, afin de réaliser un diagnostic d'altération.

Les archives historiques concernant le château ont été rassemblées et analysées pour concevoir des cartographies de dates de pose et de nature des pierres. L'examen *in situ* des façades a ensuite conduit à réaliser des cartographies d'altération. La synthèse des informations concernant le passé et le présent du monument a permis d'établir une liste des principaux facteurs environnementaux associés aux altérations, de même que la chronologie de leur développement, pour ainsi aboutir à une première estimation des cinétiques de progression.

C'est la desquamation en plaques, détérioration courante du tuffeau, à la fois la plus dommageable et la plus complexe, qui a été ciblée pour le diagnostic d'altération. Les analyses physico-chimiques réalisées sur des prélèvements *in situ* ont conduit à l'identification systématique du gypse dans les fissures des desquamations. Des simulations expérimentales ont été mises en place pour appréhender le rôle du gypse, son mode de transport et son origine. La pollution atmosphérique mettant en œuvre du SO₂ gazeux reproduit bien la distribution du gypse telle que mesurée dans les desquamations en plaques observées au château de Chambord. Un mécanisme incluant ce phénomène a été proposé, pour expliquer le développement de cette altération, et qui pourrait être à la base des prévisions de l'évolution des altérations, afin d'envisager le futur du monument.

Mots clés : Conservation du patrimoine, tuffeau, critique d'authenticité, desquamation en plaques, gypse, caractérisations physico-chimiques, simulation expérimentale

**Health record of a monument
Practical application at the castle of Chambord**

Abstract:

This thesis is dedicated to the establishment of a methodology to study the built cultural heritage, applied to the castle of Chambord. It consists in realizing the health record of the monument, and completing it by an experimental sequence in laboratory, in order to provide a diagnosis of the state of degradation.

Historical archives about the castle were gathered and analysed to obtain mappings of dating and nature of stone. By mean of *in situ* observations, a mapping of degradation has been added. A synthesis of the information concerning the past and the present of the monument allowed establishing a list of the main factors associated to degradations and to a chronology of development of these degradations, so as to estimate their kinetics.

Spalling, which is the most damaging and complex usual degradation, has been chosen as case of study for the diagnosis of degradation. The physic-chemical characterisations made on *in situ* coring lead to systematically found gypsum in spalling's cracks. Various artificial ageing tests have been performed to enlighten the role of gypsum, its transport mode, and its origin. Atmospheric pollution including gaseous SO₂ reproduces well the distribution of gypsum observed in spalling at Chambord. A global mechanism taking into account this phenomenon has been proposed to clarify the development of this degradation.

Keywords: Built heritage preservation, limestone tuffeau, critique of authenticity, spalling, gypsum, physic-chemical characterisations, artificial ageing tests



**Centre de Recherche sur la Matière Divisée (FRE 3520)
1B rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2**

