HAL
open science

Impact des interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec (Campeche, Mexique)

Paul-Edgard Genet

To cite this version:

Paul-Edgard Genet. Impact des interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec (Campeche, Mexique). Géographie. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. NNT : 2019CLFAL018 . tel-03160573

HAL Id: tel-03160573

https://theses.hal.science/tel-03160573v1

Submitted on 5 Mar 2021

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

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

Université Clermont Auvergne
UFR Lettres, Culture et Sciences Humaines
École doctorale Lettres, Sciences Humaines et Sociales

GEOLAB UMR 6042 - CNRS
Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale

Thèse présentée en vue de l'obtention du doctorat de l'Université Clermont Auvergne

Spécialité : Géographie physique

Impact des interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec (Campeche, Mexique)

Présentée et soutenue publiquement le 19 décembre 2019 par

Paul-Edgard Genet

Sous la direction de Marie-Françoise André

Membres du Jury :

Dominique Michelet .....Directeur de recherche CNRS, Université Paris I, UMR 8096 (rapporteur)
Samuel Étienne .....Directeur d'études, EPHE, UMR 6554 LETG (rapporteur)
Bruno Phalip .....Professeur, Université Clermont Auvergne, EA 1001 CHEC (examinateur)
Gilles Fronteau .....Maître de conférences HDR, Université de Reims, EA 3795 GEGENAA (examinateur)
Claire Portal .....Maître de conférences, Université de Poitiers, EA 2252 Ruralités (examinatrice)
Erwan Roussel .....IGR CNRS, Université Clermont Auvergne, UMR 6042 Geolab (examinateur)
Marie-Françoise André .....Professeur, Université Clermont Auvergne, UMR 6042 Geolab (directrice)

Avant-propos

Lorsqu'en 2011, encore étudiant de master, je découvrais les travaux de Thomas C. Meierding sur l'érosion des marbres funéraires d'Amérique du Nord, je me plaisais à imaginer le géomorphologue dormir à l'arrière de son véhicule et parcourir les cimetières de la côte ouest des États-Unis. Deux ans plus tard, en 2013, je me retrouvais à l'arrière d'un « pick-up » s'enfonçant dans une épaisse jungle en direction des vestiges du site éponyme de Río Bec, que j'allais découvrir pour la première fois. Aujourd'hui, au moment de mettre le point final à ce travail de doctorat qui a occupé sept ans de ma vie, je réalise que même si j'ai parfois ressenti la solitude du « thésard », je n'arrive à l'écriture de cet avant-propos que grâce à l'aide d'un grand nombre de personnes, qu'il convient maintenant de remercier.

Pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un sujet aussi passionnant et sur un terrain aussi exceptionnel, je tiens à remercier infiniment ma directrice de recherche, **Marie-Françoise André**. C'est en 2011, alors que j'observais des sables marins au microscope optique sur un bureau voisin du sien, qu'elle me parla pour la première fois d'un projet de recherche sur les temples mayas. J'étais, à l'époque, loin d'imaginer les péripéties qui m'attendaient, et c'est en grande partie grâce à la confiance qu'elle m'a accordée et à ses encouragements toujours bienveillants que ce travail de thèse a pu être achevé. Je garderai une immense fierté d'avoir travaillé sous la direction d'un esprit à la fois hautement érudit et incroyablement didactique, mais surtout d'une personne aussi disponible, compréhensive, et ouverte d'esprit.

Pour avoir été un des piliers de cette recherche, à travers sa connaissance approfondie du secteur Río Bec, son accompagnement scientifique rigoureux, et son aide précieuse lors des missions de terrain, je tiens à remercier chaleureusement **Dominique Michelet**. Ce travail de thèse n'aurait pas pu être mené à bien sans ses multiples réseaux et contacts mexicains. De Mexico jusque dans chaque village de la péninsule, les portes qui nous ont été ouvertes grâce à lui ont permis de conduire cette recherche avec l'appui des autorités locales, et dans de bonnes conditions.

Pour m'avoir suivi régulièrement, et pour la contribution qu'il a apportée à la maturation de mes questionnements, j'adresse mes plus sincères remerciements à **Erwan Roussel**. Son intelligence des problématiques, sa connaissance fine des processus géomorphologiques ainsi que des aspects techniques et méthodologiques, ont inspiré un grand nombre des résultats de cette recherche, et son soutien optimiste dans les moments de doute et de difficulté ont permis la poursuite et la finalisation de ce projet.

Pour m'avoir accueilli dans les locaux du groupe d'études **GEGENAA** (EA 3795, Université de Reims Champagne-Ardenne), et m'avoir aidé à trouver des réponses aux multiples questions que je me posais, en tant que néophyte des encroûtements carbonatés, je remercie vivement **Gilles Fronteau**. Sa connaissance approfondie de ces matériaux et l'efficacité de son aide lors de mon séjour à Reims ont largement contribué à ce travail.

Pour sa disponibilité et la qualité de son suivi dans le cadre du comité de thèse, je tiens à adresser tous mes remerciements à **Samuel Etienne**. Sa bienveillance et sa connaissance des problématiques auxquelles j'ai été confronté m'ont permis de me recentrer sur un projet plus solide et plus réaliste lorsque mes recherches s'éparpillaient.

Je remercie chaleureusement **Claire Portal** et **Bruno Phalip** pour avoir accepté d'examiner ce travail de thèse, en étant certain que leurs qualités scientifiques dans leurs thématiques respectives alimenteront une discussion fructueuse lors de la soutenance.

Je remercie également **l'INAH** (*Instituto Nacional de Antropología e Historia*) pour m'avoir donné l'autorisation de travailler sur le patrimoine inestimable que constituent les sites archéologiques du secteur Río Bec. Je remercie en particulier **Pedro Sanchez Nava** et **Lirio Suarez** pour leur confiance et leur appui, ainsi que le personnel de l'*archivo tecnico* à Mexico pour leur aide dans l'étude des nombreux rapports que j'ai étudié dans leurs locaux.

Pour son accueil à *l'Instituto de Geología* de la UNAM à Mexico, je remercie **Sergey Sedov**, ainsi que **Jaime Diaz** pour la préparation des lames minces que nous avons étudiées ensemble, ainsi que les analyses géochimiques. Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à **Luisa Straulino**, restauratrice à l'INAH, tant pour les échanges scientifiques que nous avons eu autour d'un sujet commun, que pour les moments agréables partagés à Mexico et lors de sa visite à Clermont-Ferrand. Pour son accompagnement lors de notre mission de terrain en 2013, ainsi que pour l'enthousiasme dont il a fait preuve autour de notre projet, je tiens à remercier vivement **Otto Ortega Morales** de la *Universidad Autonoma de Campeche*.

Le Mexique est un pays culturellement imposant où l'on se sent parfois perdu. Au cœur de la jungle urbaine de Mexico, le **CEMCA** (USR 3337) a été mon port d'attache et m'a permis de ne jamais me sentir trop éloigné de mon pays d'origine. Pour cela je remercie tous les membres de cette structure vivante et agréable, et j'adresse un clin d'œil à mes complices du 330 Sierra Leona, **Julie Baillet, Flore Horras**, **Nourah Percevault** et surtout à **Philippe Costa**, dont l'accueil au Guatemala m'a permis de pousser un peu plus loin la découverte de l'Amérique Centrale. Dans l'autre jungle, celle de la péninsule du Yucatán, mon port d'attache était situé à la petite hôtellerie ***El Viajero*** de Zoh Laguna, où **Chacho**, **Pati**, et leurs enfants **Diana**, **Mauro** et **Patita** m'ont accueilli à chaque mission. J'avais plaisir à les retrouver après chaque journée de terrain et leur présence, familiale et rassurante, m'a aidé à ne pas perdre la tête à force de passer mes journées dans les ruines d'une civilisation disparue.

Mais c'est aussi à Clermont-Ferrand que ce travail a été mené à bien, et cela n'aurait pas pu être le cas sans l'appui des membres du laboratoire **GEOLAB** (UMR 6042, UCA-CNRS), et surtout de **Chantal Menaut**, pour les aspects logistiques et administratifs et d'**Olivier Voldoire**, pour les aspects matériels et techniques. Je remercie particulièrement **Jean-Luc Peiry**, directeur de l'unité pendant le début de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée lorsque je partais en mission. Ce laboratoire a été comme une seconde maison pendant près de sept ans, et je garderai un souvenir impérissable de la salle des doctorants où **Ana Casado**, **Audrey Martinat,**

Bori Hortobagyi, Alfredo Mayoral, Paul Ledger, Adrien Favillier, et Loïc Francon ont été des sœurs et des frères d'armes exemplaires, ainsi que de tous les moments partagés avec les autres membres de GEOLAB autour d'un repas frugal acheté au « Simply » et de l'horoscope de *La Montagne*, notre canard local.

Je tiens également à remercier **Jean-Marc Hénot** et **Mhammed Benbakkar** du laboratoire **Magmas et Volcans** pour la préparation et l'observation des échantillons au microscope électronique à balayage.

La réalisation de ce projet doit aussi beaucoup à **l'École Doctorale LSHS de Clermont-Ferrand**, tant l'ancienne équipe (**Eric Lysoe** et **Stéphanie Colliche**) que la nouvelle (**Ludovic Viallet** et **Karen Vergnol Remont**), à travers son soutien et son accompagnement, ainsi que par le financement « Aires Culturelles » dont ce projet a bénéficié. Je remercie également la **Maison des Sciences de l'Homme de Clermont-Ferrand**, pour le financement de ce travail à travers le projet « CITADEL », ainsi que **l'Institut Universitaire de France,** dans le cadre du projet « Approche géoarchéologique intégrée de la dégradation de la pierre monumentale ». Sans les fonds nécessaires aux missions de terrain et aux analyses de matériaux, ce travail n'aurait pas pu aboutir.

De manière plus informelle, je souhaite également remercier plusieurs personnes qui ont joué un rôle important dans mon parcours universitaire et ma formation scientifique. **Emmanuelle Defive** et **Alexandre Poiraud**, qui m'ont transmis le goût du terrain lors du stage de troisième année de licence dans le bassin versant de Savournon, qui a confirmé ma volonté de m'essayer à la recherche en géographie physique. Lorsque, cinq ans plus tard, j'ai eu l'occasion d'accompagner des étudiants sur ce même terrain, je n'ai pas regretté mon choix. **Raphaël Paris**, qui m'a accordé sa confiance lors de ma première année de master pour aller étudier la signature sédimentaire des tsunamis sur la façade atlantique marocaine. C'est aussi lors de cette aventure-là que je me suis construit scientifiquement et que j'ai appris à organiser une mission de terrain à l'étranger.

Il y a aussi, dans toutes ces personnes qui m'ont aidé et soutenu, mes amis, et notamment **Florent, Léonard, Hervé, Fanfan, Régis, Stéphane, Sancho, Pierrot, Laura, Julien**, et tant d'autres, qui ont toujours réussi à me faire relativiser avec humour et à me faire garder les pieds sur terre. Et puis ma famille, **Geneviève** ma mère, **Rafaèle** ma sœur, et **Pascal** mon père à qui j'adresse une pensée affectueuse, ainsi que mes oncles et tantes, **Jean** et **Aline**, **Vincent** et **Sophie**, « **Tata MF** », **Odile** et tous les autres. Merci de n'avoir jamais bridé les rêves d'un petit garçon qui aimait les fossiles et les cailloux et qui faisait des expériences avec des tubes à essai. Et ma belle-famille, **Martine** et **Olivier, Mam's, Samuel, Thierry, Benoît, Lucile, Pierre, Flora et Thomas** et tous les autres. Merci pour votre soutien et votre délicatesse à mon égard.

Enfin, merci à **Marie** pour avoir été celle dont le soutien a été le plus déterminant, pour avoir toujours cru en moi, avoir supporté mes interminables journées de rédaction, estompé mes doutes et pour hier, aujourd'hui et demain, être le phare qui me mène toujours à bon port.

Sommaire

Avant-Propos **5**

Introduction **13**

PARTIE 1 : Présentation **23**

Chapitre I – De l'érosion des calcaires monumentaux en contexte tropical 25

Chapitre II – Des ruines mayas du secteur Río Bec : environnement physique et contexte archéologique 51

Chapitre III – Méthodologie 93

PARTIE 2 : Résultats **127**

Chapitre IV – Anamnèse des structures 129

Chapitre V – Caractérisation des facteurs de contrôle 167

Chapitre VI – Diagnostic de la dynamique érosive 203

Chapitre VII – Quantification de l'érosion 245

PARTIE 3 : Discussion et conclusions **261**

Chapitre VIII – Interprétation des résultats 263

Chapitre IX – Discussion des résultats 301

Épilogue **329**

Bibliographie **333**

Annexes **349**

Table des figures **395**

Table des tableaux **407**

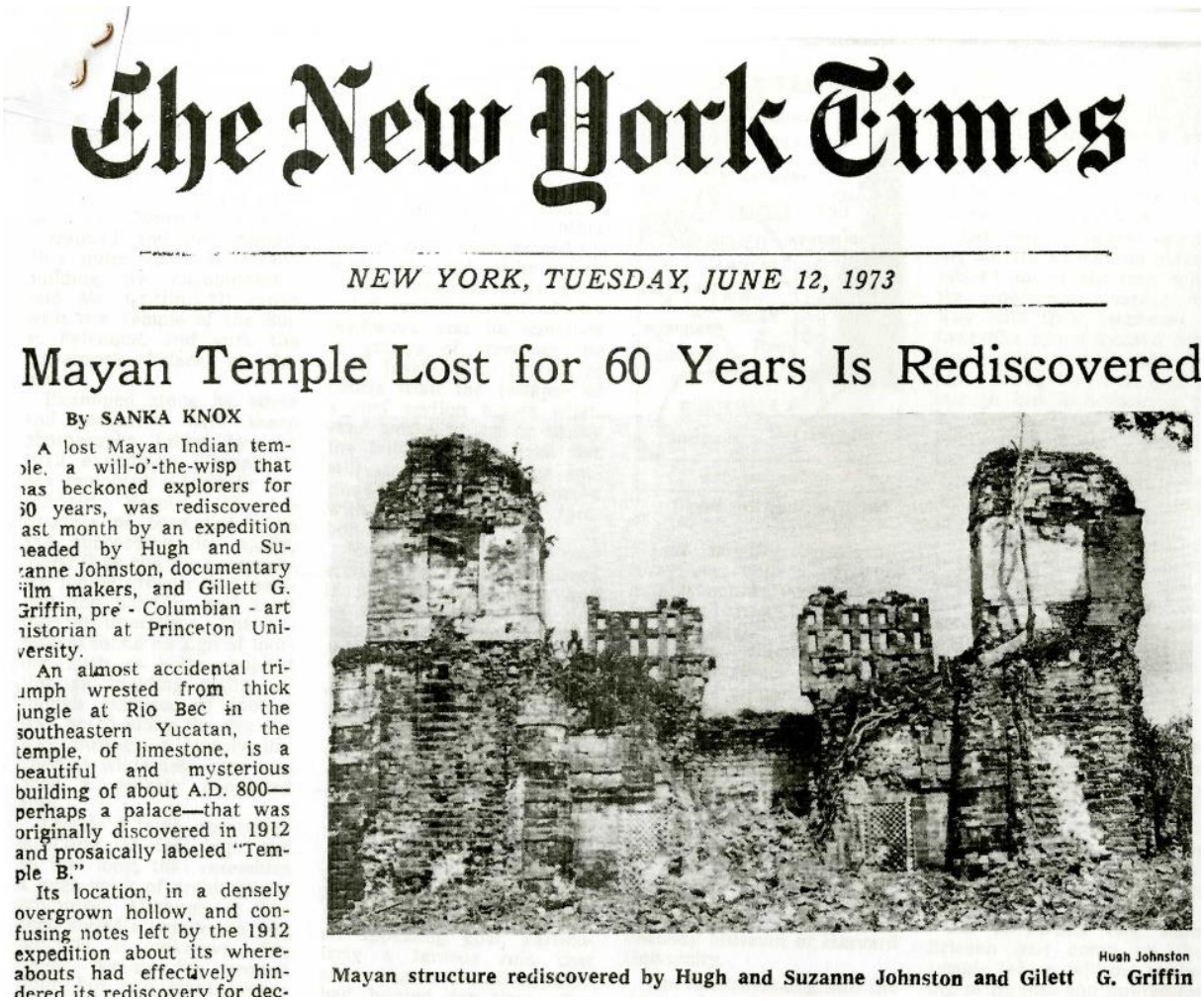
Table des matières **409**

À mes grands-pères, Paul et Edgard

À mon fils, Antoine

Introduction

Le 12 juin 1973, la une du *New York Times* est consacrée à la redécouverte d'un site archéologique maya tombé dans l'oubli depuis 60 ans (Fig. 1). Lors du tournage d'un documentaire, Hugh et Susanna Johnston, accompagnés par Gillett Griffin, historien de l'art et professeur à l'Université de Princeton, tombent accidentellement sur une des structures d'un vaste ensemble d'édifices mayas datant en majorité des VIIIe et IXe siècles de notre ère, et ayant donné leur nom à un style architectural propre : Río Bec.



The New York Times

NEW YORK, TUESDAY, JUNE 12, 1973

Mayan Temple Lost for 60 Years Is Rediscovered

By SANKA KNOX

A lost Mayan Indian temple, a will-o'-the-wisp that has beckoned explorers for 60 years, was rediscovered last month by an expedition headed by Hugh and Suzanne Johnston, documentary film makers, and Gillett G. Griffin, pre - Columbian - art historian at Princeton University.

An almost accidental triumph wrested from thick jungle at Rio Bec in the southeastern Yucatan, the temple, of limestone, is a beautiful and mysterious building of about A.D. 800—perhaps a palace—that was originally discovered in 1912 and prosaically labeled "Temple B."

Its location, in a densely overgrown hollow, and confusing notes left by the 1912 expedition about its whereabouts had effectively hindered its rediscovery for dec-

Hugh Johnston

Mayan structure rediscovered by Hugh and Suzanne Johnston and Gilett G. Griffin

Fig. 1. La une du *New York Times* du 12 juin 1973, consacrée à la redécouverte du site de Río Bec.

La nouvelle est de taille puisque la trace de ce site archéologique, enfoui dans la forêt tropicale de la péninsule du Yucatán, avait été perdue depuis les premières explorations de Mahler à la fin du XIXe siècle, et surtout les voyages de Maurice de Périgny en 1913. Aussi, cette découverte presque fortuite a permis de souligner l'état de

conservation exceptionnel des ruines de ce site archéologique, alors que les sites archéologiques voisins, pour la plupart également découverts au début du XXe siècle, ont fait l'objet d'interventions intensives de restauration et de conservation. Pourquoi donc ce site s'est-il aussi bien conservé, sans aucun entretien, au cœur de la forêt tropicale ? Cette question renvoie aux facteurs de contrôle impliqués dans la détérioration de la pierre « monumentale », mais également à l'évolution des monuments historiques en fonction des stratégies de conservation qui lui sont appliquées.

Avant toute chose, il convient en tant que géomorphologue de considérer un monument comme un objet d'étude à double entrée (Fig. 2). D'abord, il peut être assimilé à une entité géomorphologique, caractérisée par un système de pentes défini par sa morphologie architecturale, sur lequel les dynamiques érosives opèrent selon un mode pulsatoire, avec des seuils critiques dont le franchissement induit une perte de matière (Smith *et al.*, 2010). En ce sens, le monument se comporte comme un système géomorphologique, et devient un véritable laboratoire d'étude et de quantification de l'érosion. En parallèle, les différents édifices, sites archéologiques et ensembles monumentaux sont également des constructions sociales, en raison des représentations qui s'y greffent et en font un patrimoine dont la conservation devient un enjeu pour la société.

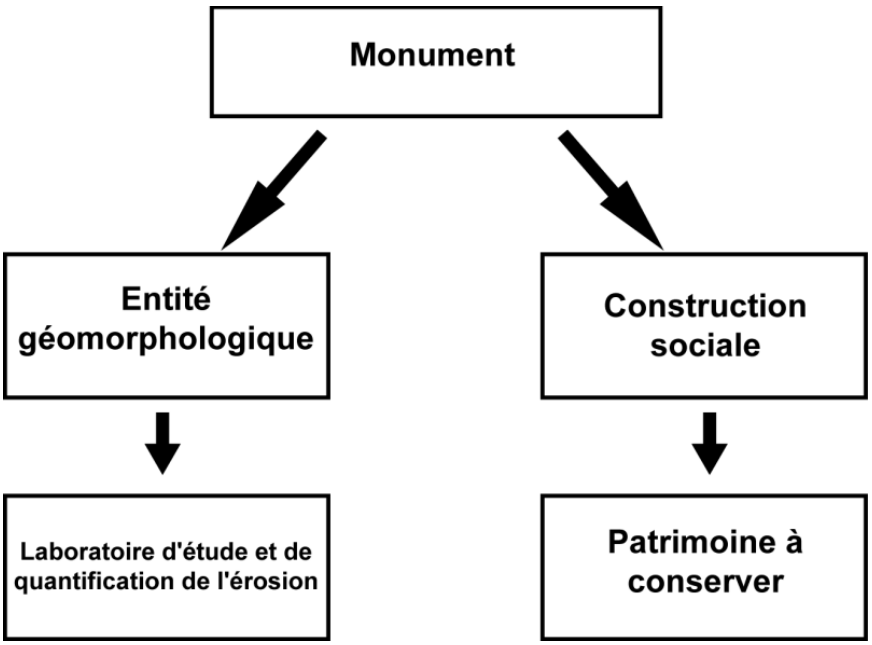


Fig. 2. Le monument : un objet d'étude à double entrée.

La vitesse et le rythme de l'érosion de la pierre monumentale sont déterminés par l'équilibre relatif entre des facteurs **intrinsèques** et **extrinsèques** conditionnant les modalités de la détérioration des roches (Paradise, 2005 ; André et Phalip, 2010), parmi lesquels :

- la morphologie architecturale du monument, et les propriétés chimiques et physiques des matériaux de construction (composition minéralogique et chimique, porosité, perméabilité, texture, structure) constituent les **facteurs intrinsèques** ;

- l'environnement bioclimatique dans lequel l'édifice est situé, conditionné par les paramètres climatiques, considérés de l'échelle régionale (vents dominants, régime des températures et des précipitations, ensoleillement) à l'échelle locale (milieu urbain ou rural, présence de végétation à proximité immédiate, potentiels micro-organismes colonisateurs, topographie voire microtopographie du site) constituent les **facteurs extrinsèques**.

L'impact anthropique, quant à lui, englobe toutes les interventions qui ont affecté les matériaux de construction (extraction, taille et pose des pierres, introduction d'enduits et de mortiers) et le monument (dégagement, opérations de restauration, nettoyage chimique ou mécanique, remplacement des pierres ou restructuration des édifices, actions sur le milieu environnant, effets de la pollution atmosphérique ou de la pression touristique,…). En venant perturber l'interaction basique entre les facteurs intrinsèques et extrinsèques, cet impact anthropique constitue un forçage qu'il convient de caractériser, d'évaluer et de quantifier. Pour ce faire, il est nécessaire d'adopter une approche systémique de la détérioration des monuments historiques, afin de déterminer dans quelle mesure les interventions humaines influencent les modalités et les régimes d'érosion commandés par cette interaction de base entre les deux ensembles de facteurs de contrôle.

L'étude de l'érosion de la pierre monumentale est également une thématique qui, par la grande diversité des facteurs qui entrent en jeu, nécessite une approche interdisciplinaire. En effet, les différentes synthèses existantes sur la détérioration des monuments historiques (Warscheid et Braams, 2000 ; Pope *et al.*, 2002 ; Turkington et Paradise, 2005) insistent sur le fait qu'un croisement entre les savoirs, les méthodes et les approches des diverses disciplines impliquées est indispensable à la compréhension

des mécanismes de détérioration et à l'élaboration de stratégies de conservation adéquates (Fig. 3).

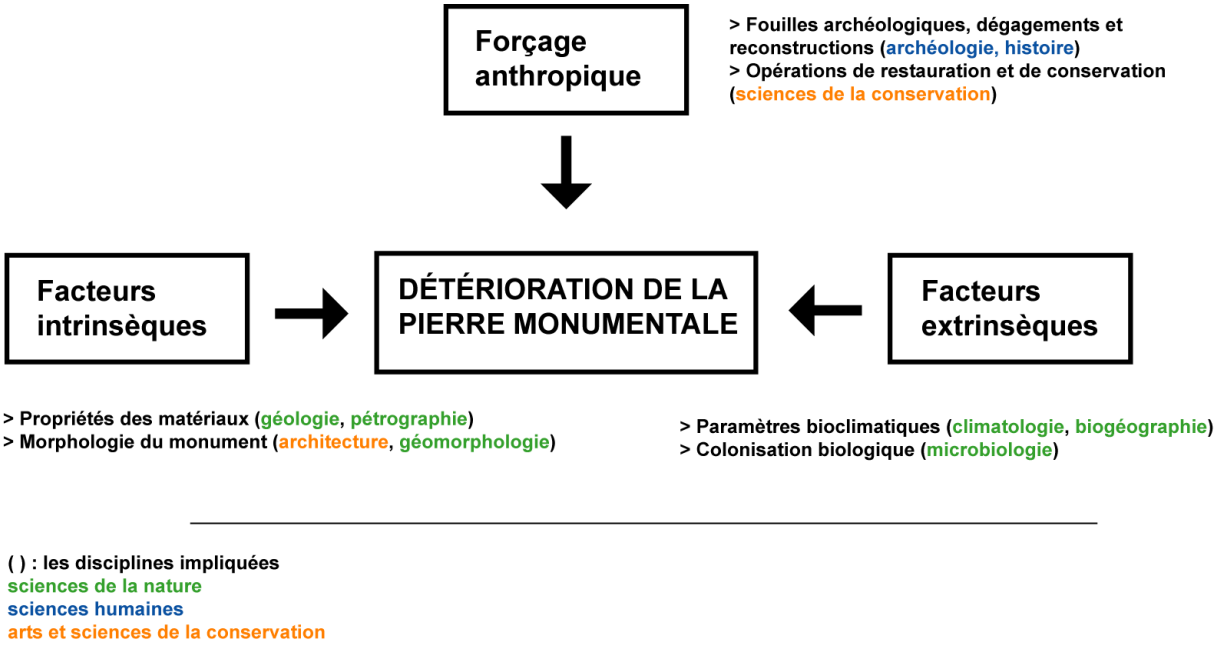


Fig. 3. Facteurs de contrôle de la détérioration de la pierre monumentale et disciplines impliquées dans la thématique de recherche.

Si de nombreuses recherches ont été menées sur la thématique de l'érosion des monuments, elles sont surtout centrées sur l'importance des propriétés physico-chimiques des matériaux de construction, notamment la porosité et la circulation de l'eau au sein de la roche (Beck *et al.,* 2003 ; Benavente *et al.*, 2004 ; Beck, 2006 ; Cnudde *et al.,* 2009), sur le rôle des sels solubles tels que le gypse (Angeli *et al.,* 2006 ; Charola *et al.,* 2006 ; Janvier-Badosa *et al.,* 2013), ou sur celui des minéraux argileux (Berthonneau, 2013). L'impact anthropique, parfois mentionné ou cité, est rarement le point central autour duquel s'articulent les problématiques de recherche, même si certains travaux ont montré les conséquences parfois néfastes des interventions humaines, notamment par le biais de la pollution atmosphérique (Brimblecombe, 2003). Certains auteurs se sont notamment intéressés aux interventions directes telles que les remplacements de pierres par des matériaux incompatibles (Blows *et al.,* 2003 ; André *et al.,* 2012b ; Concha-Lozano, 2012), et peu d'entre eux aux interventions indirectes telles que les opérations de mise en valeur sur l'environnement immédiat des édifices (André *et al.,* 2012a). Pourtant, de la construction originelle de l'édifice jusqu'à sa mise en valeur à des fins touristiques, les choix architecturaux, stylistiques et les stratégies de conservation ont un large spectre d'impact sur l'érosion d'un monument. Il convient donc de chercher

à caractériser ce forçage dans son intégralité, en tenant compte de l'ensemble des interventions pratiquées sur les sites archéologiques mayas du secteur Río Bec.

Un cadre d'analyse en lien avec la réalité du secteur étudié

Situé dans le sud-est de l'état de Campeche, au cœur de la péninsule du Yucatán au Mexique (Fig. 4), le secteur archéologique Río Bec appartient à l'aire culturelle de la civilisation maya. Le terme «Río Bec» renvoie à une région, les Basses Terres Centrales, mais aussi à un style architectural bien individualisé, correspondant à une période : le Classique récent-terminal, de 600-900 apr. J.-C. (Arnauld *et al.,* 2014).

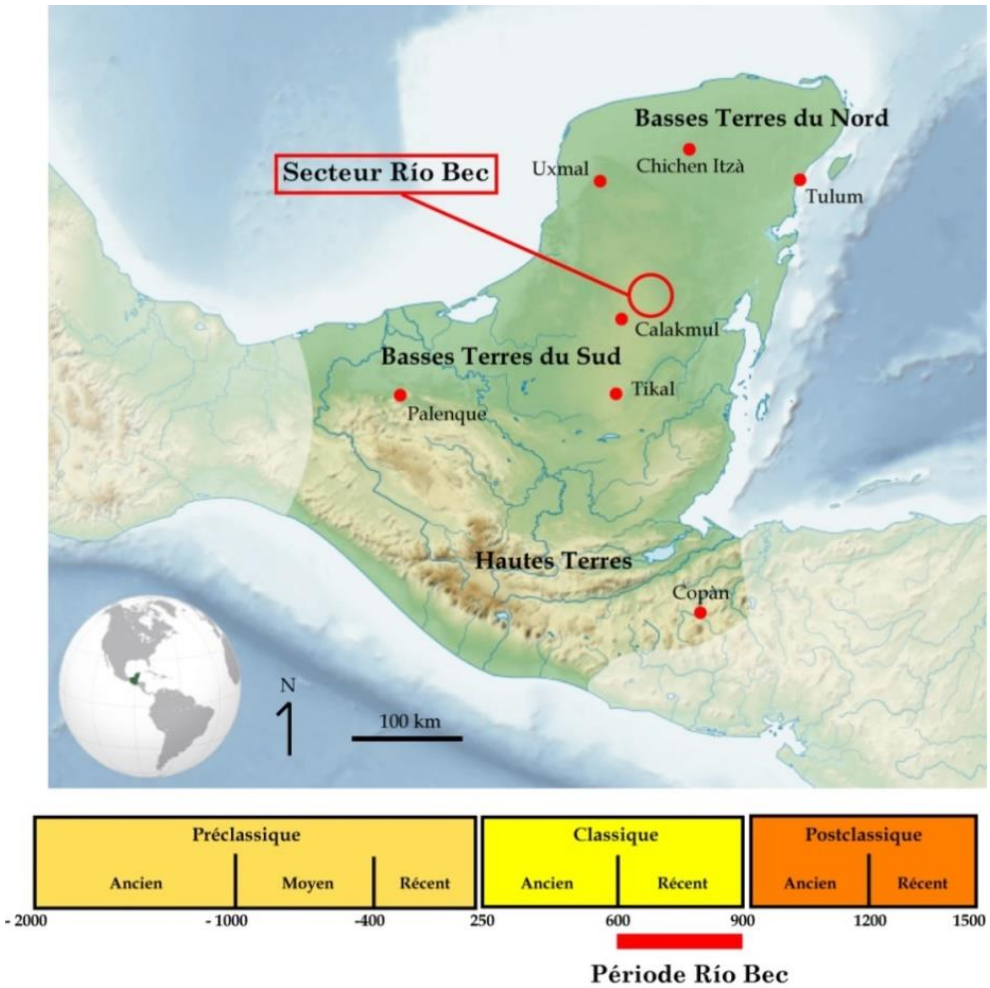


Fig. 4. Localisation du secteur archéologique étudié, et mise en perspective de la période Río Bec au sein de la chronologie de la culture maya.

Au cœur de la forêt tropicale yucatèque, les constructeurs mayas se sont affranchis des contraintes naturelles pour bâtir de vastes ensembles monumentaux, caractérisés dans ce secteur par des aspects architectoniques originaux et une

implantation particulière des structures, définie par une organisation socio-économique singulière (Michelet *et al.,* 2005 ; Nondédéo *et al.*, 2010). Ainsi, si le secteur Río Bec revêt un intérêt archéologique certain, il ne représente pas moins un enjeu de conservation important, tant par la dimension patrimoniale chère aux sociétés locales, que par la durabilité des matériaux de construction utilisés, extraits d'une croûte calcaire – localement appelée *caliche* – extrêmement vulnérable à l'agressivité climatique du contexte tropical dans lequel ces sites archéologiques évoluent.

Lors de la redécouverte des structures de la région, le dégagement des vestiges restées pendant des siècles à l'état de monticules au cœur de la forêt modifie de façon radicale les paramètres bioclimatiques dans lesquels les édifices vont évoluer, et est susceptible de provoquer une accélération de l'érosion des matériaux de construction, comme cela a été démontré sur les temples d'Angkor au Cambodge par André *et al.* (2012a), et souligné sur la grande pyramide du jaguar à Tikal (Guatemala) par García de Miguel *et al.* (1995). Le dégagement plus récent du site éponyme de Río Bec expliquerait donc son meilleur état de conservation, mais va-t-il alors évoluer de la même manière que les autres sites archéologiques des alentours ? Cette intervention est-elle la seule ayant un impact sur les modalités et les vitesses d'érosion des matériaux de construction ? Afin d'étudier avec pertinence l'impact des interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, la construction d'un cadre d'analyse s'impose : que se passe-t-il lorsque l'on redécouvre une structure archéologique ? Quelles sont les trajectoires d'interventions possibles ? Quelles seront leurs conséquences sur l'érosion des édifices ? La figure 5 présente un recensement préliminaire des trajectoires d'intervention possibles, fondé sur la littérature disponible et sur les pratiques courantes de restauration et de conservation.

La redécouverte d'une structure archéologique implique en premier lieu sa libération du monticule de terre et de végétation dans lequel elle a été enfouie pendant des siècles. Largement pratiquée par les archéologues menant des fouilles, cette première phase est souvent suivie d'une phase de consolidation permettant d'une part de retrouver l'information archéologique, et d'autre part d'assurer une intégrité structurelle au bâti. A ce stade, deux catégories d'interventions peuvent être distinguées : les interventions de base – ou classiques – et les interventions spécifiques, qui incluent par exemple le remplacement par de nouveaux matériaux au lieu de la réintroduction des matériaux existants, ou l'introduction de ciment dans les mortiers au lieu d'une simple

reprise des mortiers d'origine à l'aide de mélange comparables. Les deux dernières phases de conservation et de dégagement peuvent être menées simultanément. La phase de conservation inclut des interventions destinées à pérenniser l'intégrité du bâti par des actions préventives de la détérioration des matériaux. La phase de dégagement est quant à elle relative à la mise en valeur du site, souvent à des fins touristiques, et regroupe les pratiques courantes de dégagement du couvert forestier afin d'accroitre la visibilité des vestiges et de tracer des chemins autour des structures.

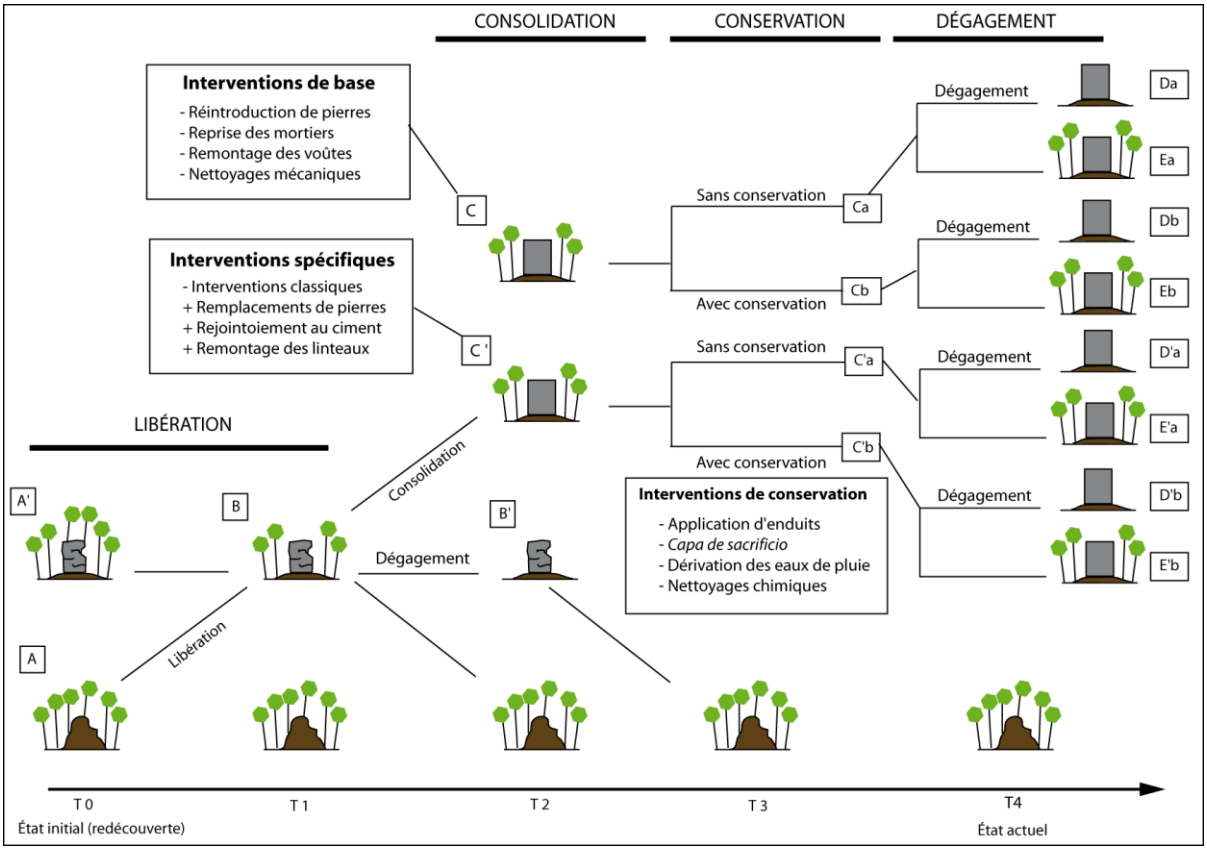


Fig. 5. Trajectoires d'interventions potentielles sur une structure archéologique après sa redécouverte.

La chronologie et l'intensité de ces différentes phases déterminent la trajectoire d'intervention d'une structure archéologique, laquelle est largement susceptible de commander des régimes de détérioration distincts par la modification des facteurs de contrôle de l'érosion. Si ce cadre d'analyse demande à être affiné en fonction de la réalité du terrain et des différentes étapes de travail, il permet de formaliser notre approche et constitue une base au questionnement central de ce travail : **dans quelle mesure les interventions humaines ont-elles influencé les modalités et les vitesses d'érosion subactuelles des calcaires monumentaux du secteur Río Bec ?** En effet, nous

chercherons dans ce travail à caractériser les modalités de l'érosion, mais aussi à quantifier son ampleur, et à identifier les facteurs potentiellement responsables de son accélération. De même, nous nous intéresserons aux dynamiques subactuelles, c'est-à-dire à la détérioration consécutive à la redécouverte des structures, l'érosion des matériaux de construction durant la période originelle et la période d'abandon n'étant pas documentée et difficilement quantifiable.

Des étapes de travail correspondant à des objectifs de recherche

Afin de répondre à notre questionnement, le travail de recherche s'est déroulé en quatre étapes, chacune répondant à un ou plusieurs objectifs de recherche. La figure 6 propose un récapitulatif de ces étapes et objectifs, ainsi qu'un aperçu de la méthodologie adoptée pour y répondre.

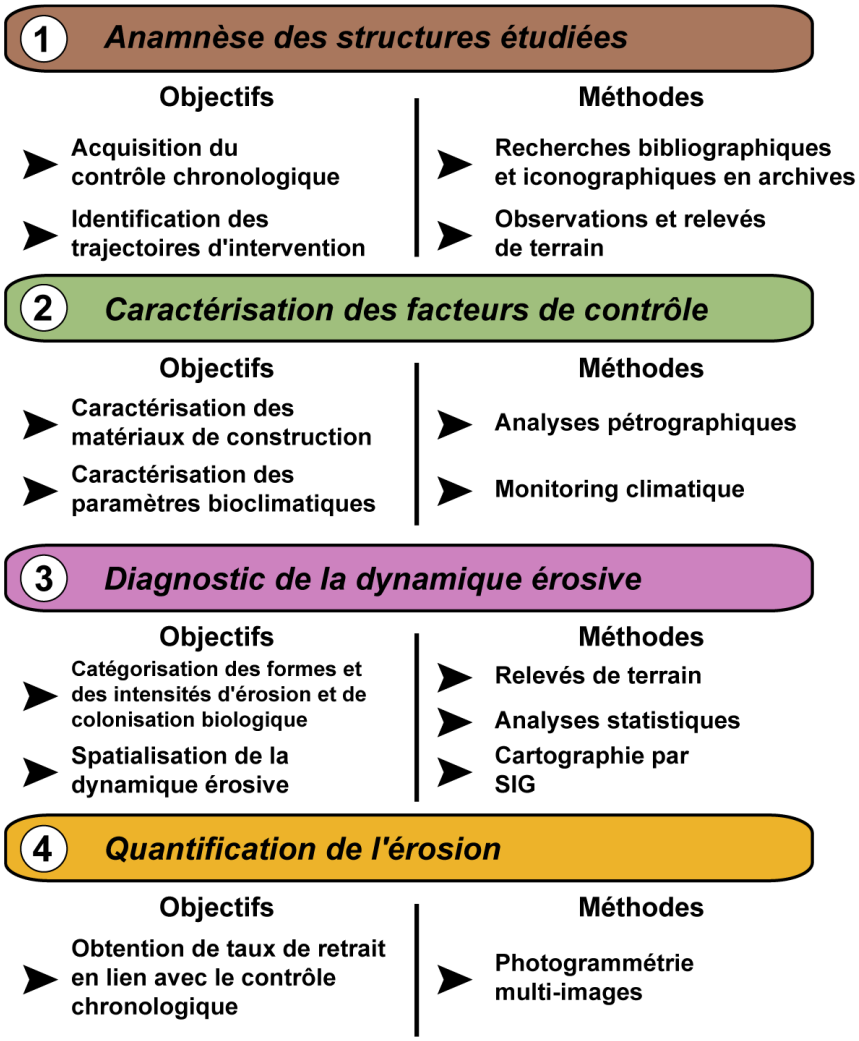


Fig. 6. Les quatre étapes de travail en lien avec les objectifs identifiés et les méthodes adoptées pour y répondre.

La première étape du travail consiste à réaliser l'anamnèse des structures étudiées. Fondée sur l'analogie avec la médecine pour la compréhension de la détérioration de la pierre monumentale chère à Smith et Prikryl (2007), l'anamnèse consiste à collecter l'ensemble des informations concernant les antécédents un patient – ici, un monument – pouvant aider à établir un diagnostic. Il s'agit donc ici de rechercher les dates des interventions dont la structure a fait l'objet, avec l'objectif principal d'acquérir un contrôle chronologique précis sur les surfaces rocheuses étudiées (dates de dégagement et d'exposition aux agents atmosphériques, dates de consolidation et de restauration). En lien étroit avec les observations de terrain, ces informations nous aideront à définir les trajectoires d'intervention servant notre cadre d'analyse. La deuxième étape consiste à caractériser les facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques définissant les modalités de détérioration des calcaires monumentaux de ce secteur, afin d'être en mesure d'identifier les perturbations anthropiques induites par les interventions humaines. Troisièmement, le diagnostic de la dynamique érosive permet, sur la base d'observations géomorphologiques sur le terrain par la suite spatialisées et analysées statistiquement, de dresser un état des lieux de la détérioration des matériaux de construction sur les différentes structures étudiées. En parallèle, il permet également l'identification de surfaces rocheuses particulièrement érodées qui seront quantifiées lors de la dernière étape. Celle-ci permet d'obtenir des taux de retrait de la pierre, par rapport à des surfaces de références datées, en lien avec le contrôle chronologique préalablement acquis lors du travail d'anamnèse.

Le présent manuscrit s'organise en trois parties, dont la première visera la présentation et la mise en contexte de ce travail. D'une part, au niveau scientifique, avec un état de l'art sur l'érosion des calcaires monumentaux en contexte tropical. D'autre part, au niveau régional, avec un deuxième état de l'art géographique intégrant le contexte géologique et bioclimatique, ainsi que le contexte archéologique du secteur étudié. Cette première partie comprendra également un chapitre présentant la méthodologie adoptée dans ce travail. La deuxième partie présentera les résultats obtenus en quatre chapitres articulés dans l'ordre des étapes de travail précédemment présentées. Enfin, la troisième partie introduira l'interprétation des résultats présentés selon des axes transversaux et aboutira sur une discussion de ces résultats, dressant un bilan scientifique et méthodologique du travail effectué.

PARTIE 1

Présentation

Chapitre I

De l'érosion des calcaires monumentaux en contexte tropical

> *« Le principe des temps modernes consiste d'abord à négliger les édifices, puis à les restaurer. Prenez soin de vos monuments et vous n'aurez nul besoin de les restaurer. »*
>
> John RUSKIN, *Les Sept Lampes de l'Architecture*, 1849.

L'érosion de la pierre monumentale est une thématique de recherche qui mobilise un grand nombre de disciplines, qui l'abordent selon des approches, méthodes et paradigmes différents. Pour cette raison, il convient de dresser un bref état des lieux de l'évolution récente du paysage de la recherche sur l'érosion de la pierre monumentale, lequel se concentrera sur les travaux qui ont inspiré notre approche et qui correspondent à notre culture scientifique. Après cet historique, nous proposerons une revue des travaux qui ont porté sur la durabilité des calcaires monumentaux et les modalités de leur détérioration. Nous tenterons ensuite d'affiner notre appréciation du rôle des microorganismes, entre biodétérioration, bioprotection, voire bioremédiation, dans un contexte bioclimatique favorisant la croissance et la subsistance des agents biologiques. Enfin, nous mettrons en évidence la sous-estimation de l'impact des interventions humaines, et la faible représentation des travaux concernant cet aspect dans des contextes lithologiques et bioclimatiques comparables.

1. Évolution récente du paysage de la recherche sur l'érosion de la pierre monumentale

Au début des années deux-mille, Pope *et al.* (2002) insistaient sur le rôle croissant des géomorphologues au sein des disciplines impliquées dans les recherches sur l'érosion de la pierre monumentale. En effet, leur prédisposition à étudier les systèmes complexes par des approches holistiques et interdisciplinaires les placerait, selon ces mêmes

auteurs, dans une position nodale, à la croisée des sciences naturelles et des sciences de la conservation (Fig. I-1). De surcroît, leur compréhension des mécanismes impliqués dans la détérioration des roches justifierait leur contribution à cette thématique de recherche (Smith *et al.,* 1992), jusque-là restée l'apanage des architectes et des chercheurs en sciences de la conservation. Ce constat fait suite à une décennie au cours de laquelle certains géomorphologues, surtout anglo-saxons, ont commencé à s'interroger sur les effets de la pollution atmosphérique (Jaynes et Cook, 1987 ; Meierding, 1993a et 1993b), et de l'environnement urbain (Viles, 1990) sur les monuments, et plus globalement sur ce qui allait être appelé « *built heritage* » (patrimoine bâti) ou encore « *cultural stone* » (pierre monumentale).

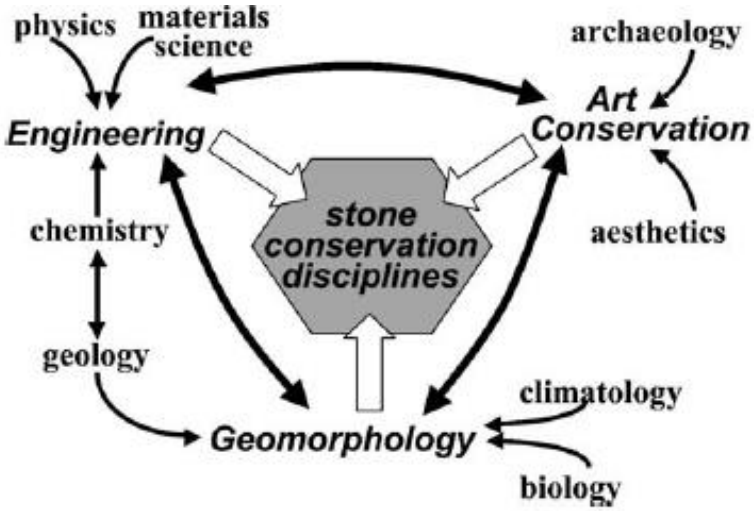


Fig. I-1. Les disciplines impliquées dans l'étude de la conservation de la pierre monumentale (Pope *et al.,* 2002).

La recherche anglo-saxonne restera très productive dans les années deux-mille et deux-mille dix, avec des figures de proue telles que Bernard Smith de la *Queen's University* de Belfast, ou Heather Viles de l'Université d'Oxford, qui introduiront les principales problématiques de l'approche géomorphologique de l'érosion de la pierre monumentale : l'appréciation du rôle des microorganismes qui colonisent les monuments (Viles, 1995), au moment où émerge le concept de « bioréceptivité » de la pierre (Guillite, 1995) ; l'identification et la cartographie des formes et de l'intensité de l'érosion (Mottershead, 2000 ; Inkpen *et al.*, 2001) ; les problèmes de changement d'échelles spatio-temporelles dans l'interprétation des résultats (Smith, 1996 ; Viles, 2001) ; ainsi que l'importance de l'acquisition du contrôle chronologique des structures en procédant par analogie avec l'anamnèse en médecine (Smith et Prikryl, 2007). Pourtant, ils ont également insisté sur le fait que, malgré des décennies de recherches, il existe encore des

lacunes dans notre compréhension de l'érosion de la pierre monumentale et surtout dans sa prédictibilité, les systèmes étudiés évoluant selon des comportements non linéaires, voire chaotiques (Viles, 2005). Travaillant majoritairement sur des terrains situés dans les îles britanniques, ils ont aussi cherché à proposer des modèles conceptuels d'érosion des calcaires monumentaux (Smith et Viles, 2006 ; Wilhelm *et al.,* 2017) et à transférer leurs résultats aux acteurs de la conservation (Prikryl et Smith, 2007).

Parallèlement, des recherches sont également menées en Allemagne par Bernd Fitzner et Kurt Heinrichs sur le site jordanien de Petra (Fitzner et Heinrichs, 1991 ; Heinrichs, 2008), puis sur les calcaires égyptiens du Caire (Fitzner *et al.,* 2002), et sur le Mont Nimrod en Turquie (Heinrichs et Fitzner, 2007). Dans ces travaux, les géologues de l'Université d'Aix-la-Chapelle font écho aux travaux des Britanniques en insistant également sur la valeur de l'anamnèse des structures en analogie avec la médecine (Fitzner, 2004), première étape d'un triptyque anamnèse-diagnostic-thérapie, et ils proposent des méthodes de cartographie et de catégorisation (Fig. I-2) des formes de détérioration (Fitzner *et al.,* 1997 ; Heinrichs, 2008).

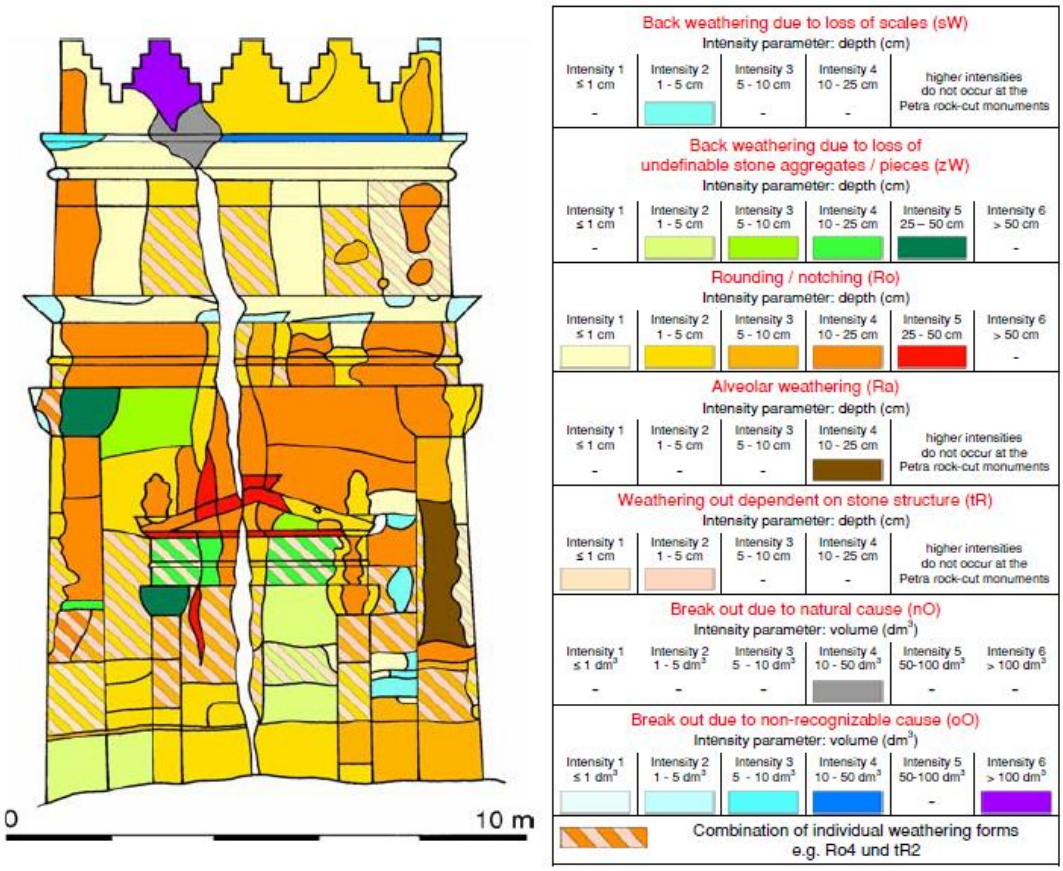


Fig. I-2. Cartographie des formes et intensités d'érosion sur les grès de Petra en Jordanie (Heinrichs, 2008).

En dehors de ces deux écoles très productives et prestigieuses, d'autres recherches ponctuelles sont menées dans les années quatre-vingt-dix. Mulvin et Lewis (1994) étudient les mécanismes de détérioration sur la *Regent House* du *Trinity College* à Dublin, et Grasseger (1999) propose une première synthèse des théories de l'époque sur l'érosion de la pierre monumentale. Du reste, les chercheurs en sciences de la conservation s'inquiètent des dégâts provoqués par la croissance des plantes vasculaires (Mishra *et al.,* 1995), et les botanistes se saisissent des problématiques de la biodétérioration, en étudiant par exemple les facteurs affectant la colonisation et l'érosion par les microorganismes (Ortega Calvo *et al.,* 1995), et commencent à envisager que ces derniers soient aussi capables de protéger l'épiderme rocheux dans des environnements agressifs (Ariño *et al.,* 1995). Au cours des années deux-mille, ces problématiques connaissent un grand succès sous la plume des microbiologistes, qui commencent à proposer des synthèses des connaissances sur la biodétérioration de la pierre monumentale en général (Warscheid et Braams, 2001 ; Gorbushina, 2007), ou sur le rôle plus spécifique des lichens (Chen *et al.,* 2000), des microbes (Videla, 2001 ; MacNamara et Mitchell, 2005) ou des cyanobactéries (Crispim et Gaylarde, 2005).

En France, Etienne (2008) a souligné la faible prise en charge de la thématique de l'érosion de la pierre monumentale par les géographes, au profit des physiciens des matériaux, géologues, et chercheurs en sciences de la conservation. La géographie française est pourtant pionnière dans le domaine, avec le premier travail de Jean Delvert sur l'altération des grès d'Angkor au Cambodge (1963), dans lequel le géographe tente d'expliquer les formes d'altération observées par les processus de météorisation tout en gardant un souci constant de quantification de l'érosion. Plus tard, Samson-Gobert (1993) soutient une thèse sur l'influence du milieu urbain et maritime sur la dégradation de la pierre de Caen, et Sellier (1991 et 1997) utilise les mégalithes de l'alignement de Carnac comme marqueurs de la vitesse d'érosion des granites armoricains. Si un retour au Cambodge s'effectue en 2004 dans la continuité de Delvert par les géographes du laboratoire Geolab de Clermont-Ferrand (voir entre autres André *et al.,* 2008 et 2012b), avec en parallèle un programme sur l'impact des restaurations dans les églises romanes d'Auvergne (André et Phalip, 2010), les quelques thèses soutenues depuis le constat d'Etienne en 2008 sont issues des sciences des matériaux (Beck, 2006 ; Ezzdine, 2009) ou de la géologie (Concha-Lonzano, 2012 ; Berthonneau, 2013 ; Denecker, 2014).

Force est de constater que la dynamique initiée par les géographes anglo-saxons dans les années quatre-vingt-dix et deux-mille n'a pas été poursuivie. D'abord par les géographes français, qui ont laissé cette thématique aux sciences de la terre et aux sciences des matériaux. Ensuite, et plus généralement, par les géographes qui n'ont pas réussi à faire valoir cette position nodale vantée par Pope *et al.* (2002), et dont la contribution à l'étude de la détérioration de la pierre monumentale s'est réduite comme peau de chagrin à partir des années deux-mille-dix, en dehors de quelques travaux poursuivis par l'équipe d'Oxford sous la direction d'Heather Viles. En somme, on peut surtout regretter que depuis quelques années, on assiste à un retour au cloisonnement et au repli disciplinaire dans le cadre d'une thématique de recherche pourtant dotée d'un formidable potentiel interdisciplinaire. Par ailleurs, il devient également difficile de se retrouver au sein de la multiplication des références bibliographiques actuelles, à la fois due à l'évolution des stratégies de publication scientifique mais également à l'essor du numérique.

2. Durabilité et vulnérabilité des calcaires monumentaux

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50% de carbonate de calcium ($CaCO_3$) cristallisé sous forme de calcite. Elle est rarement pure et présente comme principaux composants secondaires des argiles, quartz et oxydes, souvent considérés comme des « impuretés ». C'est la roche dont les affleurements sont les plus présents et les plus accessibles par les sociétés à la surface de la Terre. Les calcaires sont considérés comme des matériaux durables dont le travail est aisé, ils sont à ce titre très largement utilisés comme pierres de construction en France (Dessandier *et al.,* 2009), en Europe (Smith *et al.,* 2010) et dans le monde. Leur durabilité est toutefois variable en fonction de leurs caractéristiques physiques, notamment leur porosité, leur dureté ou leur contenu fossilifère, leur composition chimique restant largement dominée par la calcite (Smith et Viles, 2006). C'est ainsi qu'on retrouve sous la dénomination « calcaire » une grande variété de matériaux de construction, dont l'aspect, la couleur, et surtout la durabilité dépendent en grande partie de ces caractéristiques physico-chimiques. Les travaux ayant porté sur les modalités de leur détérioration évoquent les pluies acides liées à la pollution atmosphérique, notamment en milieu urbain et les transferts hydriques au sein du réseau poreux, en lien avec la cristallisation des sels, comme principales causes d'accélération de l'érosion des calcaires monumentaux. Les travaux menés sur la biodétérioration des matériaux carbonatés, en raison de la forte

représentation de cette thématique, feront l'objet de la section suivante, dans laquelle nous tenterons d'apprécier le rôle des agents biologiques en contexte tropical.

2.1. Milieu urbain, pollution atmosphérique et pluies acides

Dès la fin des années quatre-vingt, Jaynes et Cooke (1987) mettent en évidence la haute concentration et l'impact des polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), ou l'oxyde d'azote (NO_x) sur les calcaires londoniens de type *Portland stone* et *Monk Park's stone*. Le dioxyde de carbone accentue l'acidité des précipitations et ainsi l'efficacité des processus chimiques de dissolution des roches carbonatés. Le dioxyde de soufre, quant à lui, réagit avec le carbonate de calcium pour former une croûte de gypse (un sulfate de calcium doublement hydraté : $CaSO_4 2H_2O$) à la surface de la pierre (Fig. I-3).

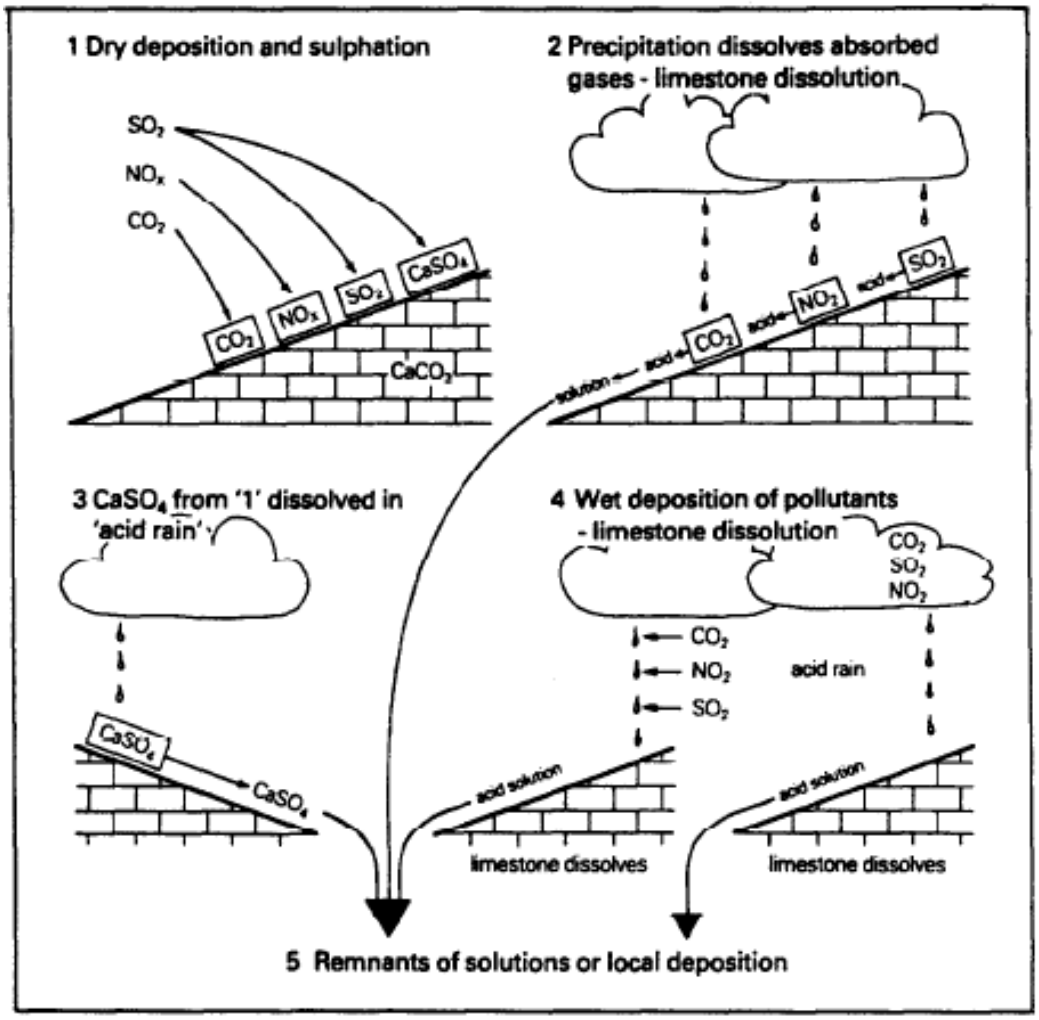


Fig. I-3. Différents phénomènes de détérioration des calcaires londoniens (*Portland stone* et *Monk Park's stone*) par les polluants atmosphériques (Jaynes et Cooke, 1987).

Viles (1990) confirme ces observations en identifiant les premiers signes de la détérioration de ces mêmes matériaux en milieu urbain : une accentuation de l'érosion chimique par dissolution sur les surfaces exposées à la pluie, une croissance et une cristallisation du gypse sur les surfaces abritées. De surcroît, Meierding (1993b) montre que les hautes concentrations en SO2 sont positivement corrélées aux taux de retrait constatés sur les marbres du patrimoine funéraire américain. Un peu moins de dix ans plus tard, Brimblecombe (2003) synthétise les connaissances sur les effets de la pollution et du milieu urbain sur l'érosion de la pierre monumental dans un travail largement axé sur les matériaux calcaires européens. Smith et Viles (2006) proposent un modèle conceptuel de détérioration des calcaires oolithiques d'Oxford (Fig. I-4), en insistant sur leur double vulnérabilité : aux processus chimiques de dissolution et de sulfatation d'une part, aux processus mécaniques de cristallisation des sels et d'alternances de gel-dégel d'autre part.

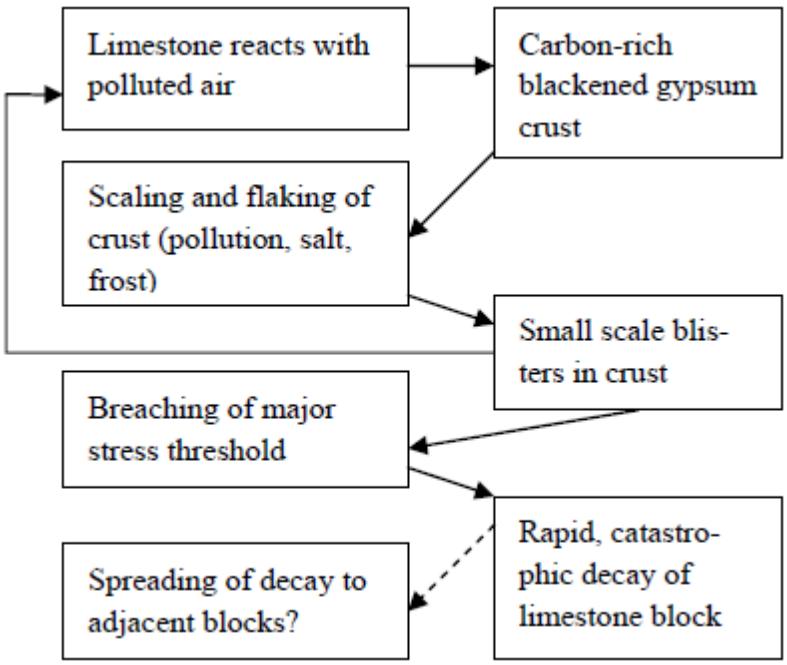


Fig. I-4. Modèle conceptuel de la détérioration des calcaires monumentaux en milieu urbain, proposé par Smith et Viles (2006).

Dans le modèle proposé par Smith et Viles, les encroûtements de gypse jouent un rôle essentiel dans le sens où ils se développent à la surface des roches carbonatés en cristallisant et en s'associant aux cristaux de calcite, se substituant ainsi au calcin de surface. Les *black crusts* ont ainsi recouvert un grand nombre de monuments à travers l'Europe, et leurs composition et vitesse de formation ont été largement étudiées par Bugini *et al.* (2000), Montana *et al.* (2008), Török (2008) et Török *et al.* (2011),

notamment par microscopie électronique à balayage, diffraction des rayons X, traçage isotopique, et fluorescence. Cette croûte de gypse, une fois exposée aux agents atmosphériques (polluants, autres sels, gel), s'écaille et se desquame, laissant la roche « nue » et entraînant une accélération de sa détérioration. La chute de la croûte de gypse constitue donc un seuil important à partir duquel un autre régime d'érosion va opérer (Fig. I-5). Ce modèle est globalement confirmé par d'autres travaux dans les années deux-mille, notamment dans les différentes contributions à l'ouvrage de Smith *et al.* (2010). Toutefois, la *review* de Charola *et al.* (2006) sur le rôle du gypse dans la dégradation de la pierre monumentale pointe les lacunes qu'il reste à combler, notamment en termes d'influence des autres sels solubles. Plus récemment, des travaux ont montré que malgré les nouvelles politiques de réduction de la pollution atmosphérique, l'extension des *black crusts* continue à témoigner de la haute concentration des polluants organiques et inorganiques dans l'atmosphère (Eyssautier-Chuine *et al.,* 2016 ; Farkas *et al.,* 2018).

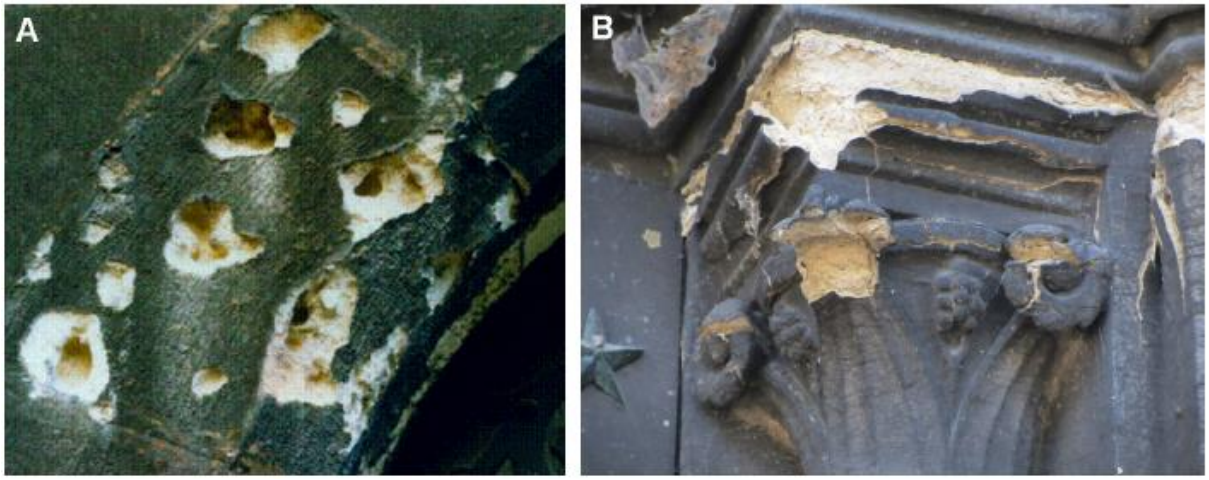


Fig. I-5. Exemples typiques de *black crusts*, en dessous desquelles se développe une désagrégation granulaire importante (Delgado Rodrigues, 2015).

Au-delà de la pollution atmosphérique en tant que telle, il convient de souligner que le principal aspect de la détérioration des calcaires monumentaux relatif à cette problématique réside dans la cristallisation d'un sel (le gypse) à la surface de la pierre. Il convient dès lors de faire le point sur ces phénomènes de cristallisation des sels, en lien avec la qualité des transferts hydriques au sein des matériaux de construction calcaires. A l'issue de ce dernier point, nous évoquerons brièvement le rôle des argiles, qui sont susceptibles de constituer un facteur intrinsèque de détérioration mécanique dans les calcaires monumentaux.

2.2. Transferts hydriques, cristallisation des sels et rôle des argiles

De nombreux travaux ont été publiés sur les transferts hydriques et la cristallisation des sels dans les monuments calcaires. Pour l'essentiel, il s'agit de simulations effectuées en environnement contrôlé en laboratoire. Rodriguez-Navarro et Doehne (1999) ont montré que la détérioration physique exercée lors de la cristallisation des sels dépend des facteurs environnementaux qui conditionnent saturation en eau, mise en solution et évaporation, et des propriétés de la roche et des sels qui conditionnent les modes de cristallisation. En quantifiant les pertes de matière, Benavente *et al.* (2001) ont établi une classification de la durabilité des calcaires monumentaux en fonction des taux d'humidité relative auxquels ils sont soumis, et Lopez-Arce *et al.* (2008) a reproduit la desquamation en plaques en laboratoire pour évaluer l'impact des cycles d'humectation et de dessiccation sur ces processus. Camuffo et Giorio (2003) ont également démontré quantitativement que les apports d'humidité par condensation lors des rosées ne devaient pas être sous-estimés, et Cardell *et al.* (2008) ont souligné que les transferts hydriques de solutions riches en ions magnésiens avaient un pouvoir érosif supérieur à celui des solutions mélangées.

Dans tous ces travaux, la cristallisation des sels et les transferts hydriques au sein des pierres calcaires dépendent largement du réseau poreux et des microstructures de la roche. Par sa nature sédimentaire, le calcaire est en effet susceptible de présenter une porosité élevée, mais également un réseau poreux très connecté. Les travaux de Cnudde *et al.* (2009) soulignent d'ailleurs l'importance de cet aspect du calcaire par rapport aux grès, avec des techniques de porosimétrie au mercure et de micro-tomographie. Beck (2006) a également mis en évidence la corrélation entre la capacité de transfert hydrique de matériaux calcaires et leur degré d'altération par des analyses statistiques multivariées. Ces caractéristiques du réseau poreux favorisent le lessivage des éléments chimiques par les eaux de pluie et la prise en charge des impuretés présentes dans la roche, telles que les sels solubles, qui sont ensuite déposées à la surface de l'épiderme rocheux, cristallisent et exercent ainsi une pression mécanique sur les matériaux. Par ailleurs, dans les environnements marins, la cristallisation des sels dans les pores de la pierre a été reconnue comme principale responsable du développement de l'alvéolisation dans les calcaires de l'île de Malte (Fig. I-6) par Rothert

et al. (2007) grâce à des analyses pétrographiques par microscope polarisant, rayons X et fluorescence.

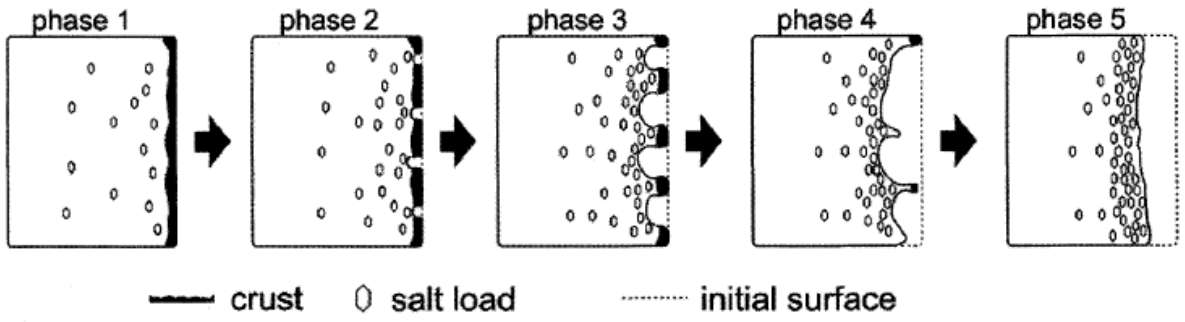


Fig. I-6. Développement en cinq phases de l'alvéolisation sur les calcaires de Malte (Rothert *et al.*, 2007).

Le rôle des alternances de gonflement et de rétraction des argiles contenues dans les matériaux de construction a également été pointé du doigt comme une des possibles causes de détérioration mécanique. Ce constat a été réalisé sur les calcaires égyptiens par Rodriguez-Navarro *et al.* (1997), dans lesquels ces alternances ont provoqué des phénomènes de desquamation. Dans la « pierre du Midi », un lien a été établi entre le degré de desquamation en plaques et la quantité de feuillets d'argiles de la famille des phyllosilicates par Berthonneau (2013). La teneur en argiles des matériaux n'est donc pas un élément à négliger lors de l'étude des modalités de leur érosion.

Au total, la durabilité des matériaux calcaires paraît, comme pour n'importe quelle autre roche, être dépendante du jeu des facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques. D'une part, les caractéristiques des matériaux permettent aux processus érosifs de disposer d'un « support » plus ou moins favorable à leur efficacité, parmi lesquels on retiendra des aspects purement physiques (étendue et connectivité du réseau poreux), ainsi que la composition des roches (teneur en sels solubles et en argiles). D'autre part, les paramètres de l'environnement dans lequel s'inscrivent les monuments interagissent avec ce support pour activer les processus, parmi lesquels on retiendra les paramètres climatiques (apport en eau par les précipitations), mais aussi anthropiques (apport en polluants atmosphériques). Au sein de ces facteurs extrinsèques et environnementaux, les microorganismes constituent par ailleurs un thème de recherche particulièrement prisé, non seulement par les microbiologistes, mais également par un grand nombre de disciplines qui tentent d'apprécier toujours plus finement le rôle de ces agents biologiques.

3. L'appréciation du rôle des microorganismes

En 1995, Guillite propose le concept de « bioréceptivité » de la pierre monumentale en tant que capacité d'un matériau de construction à être colonisé par des organismes vivants, et suggère des efforts d'interdisciplinarité et de standardisation des protocoles expérimentaux dans l'étude de cette thématique, qui n'aboutiront malheureusement pas (Miller *et al.,* 2012). En revanche, la littérature scientifique ayant trait aux problématiques de biodétérioration, et plus généralement à l'appréciation du rôle des microorganismes qui recouvrent certains monuments historiques est extrêmement prolifique, et couvre un vaste champ de disciplines. Aussi, il est préférable dans cette section de s'intéresser principalement à l'évolution de cette appréciation, entre biodétérioration, bioprotection, mais aussi bioremédiation, en ciblant au maximum le corpus de travaux étudiés sur ceux qui ont été menés sur des lithologies similaires (matériaux carbonatés) en contexte bioclimatique comparable (tropical).

3.1. Biodétérioration : organismes impliqués et processus associés

Depuis les années soixante-dix où l'on qualifiait de « maladie de la pierre » les recouvrements biologiques sur les monuments historiques ou les sites patrimoniaux (Lefèvre, 1974), de nombreuses publications ont souligné les effets délétères des organismes sur les matériaux de construction. Des premières tentatives de synthèse des travaux menés sur ces problématiques (Warscheid et Braams, 2001) jusqu'aux récents développements qui introduisent les concepts de biomorphogenèse (Tiano, 2016), la colonisation biologique a toujours été essentiellement perçue comme néfaste pour les monuments historiques. Dans les milieux tropicaux, où les températures et les taux d'humidité élevés favorisent la croissance et la subsistance d'une grande variété de microorganismes à la surface des épidermes rocheux, cet axe de recherche est particulièrement prisé par les microbiologistes qui en ont fait leur principale contribution à l'étude de la détérioration de la pierre monumentale. En effet, Gaylarde et Gaylarde (2005), dans une étude comparative du développement de biofilms sur les monuments en Europe et en Amérique Latine, ont attesté leur plus grande fréquence d'observation sur le continent américain. Par ailleurs, Miller *et al.* (2009) ont également insisté sur la bioréceptivité élevée des calcaires en comparant cinq matériaux de construction carbonatés : leurs résultats montrent en outre que plus le calcaire est

grossièrement grainé, poreux et perméable, plus il favorise la croissance des organismes phototrophes. Au total, les calcaires monumentaux en contexte tropical sont donc très susceptibles d'être concernés par les problématiques de biodétérioration.

Kumar et Kumar (1999) ont proposé un état des lieux de la biodétérioration dans les environnements tropicaux, dans lequel ils distinguent trois catégories de mécanismes : la détérioration biophysique ; la détérioration biochimique par les processus assimilatoires et dissimilatoires ; et la détérioration esthétique (Fig. I-7). Ils insistent également sur le fait que la biodétérioration ne doit pas être considérée comme un phénomène isolé, mais comme un phénomène conjoint de la détérioration physico-chimique due aux agents atmosphériques, cependant susceptible d'entraîner des pertes de matière bien plus importantes.

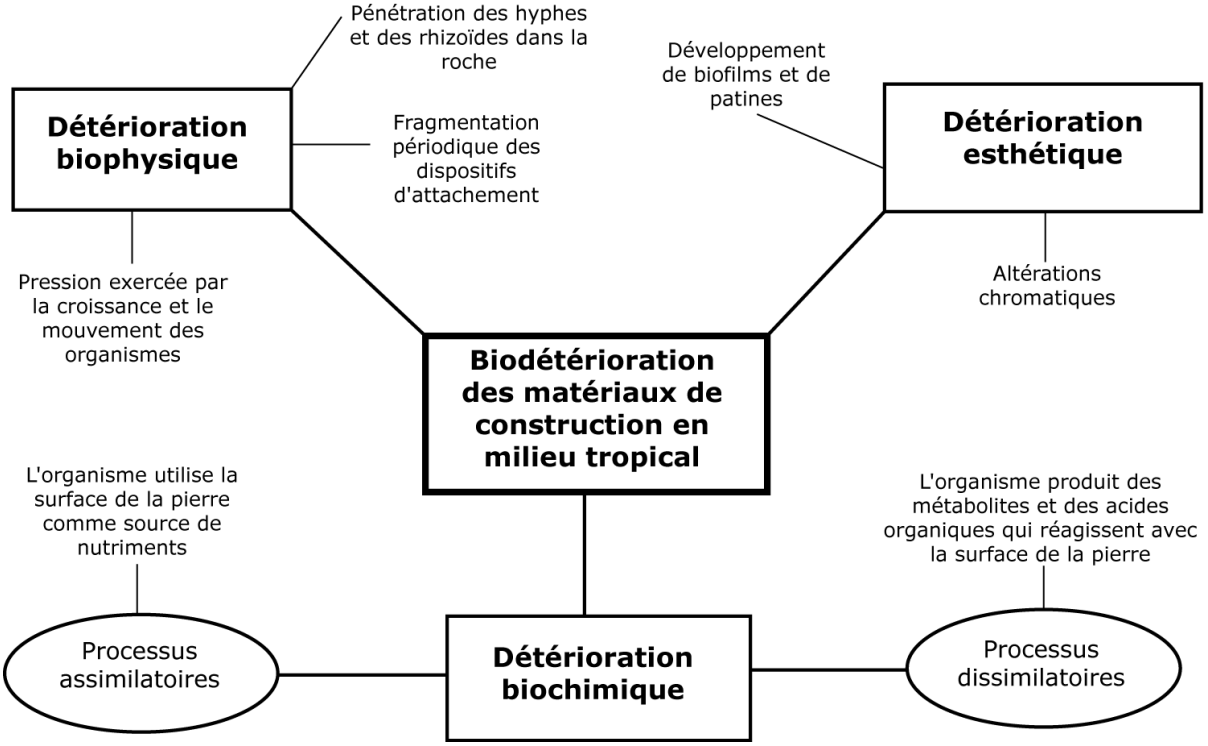


Fig. I-7. Différents types de mécanismes dans la biodétérioration des matériaux de construction en milieu tropical (d'après Kumar et Kumar, 1999).

Toujours selon Kumar et Kumar (1999), les mécanismes de biodétérioration à l'œuvre dépendent largement des agents biologiques présents à la surface de la pierre, qui ont des prérequis écologiques et physiologiques spécifiques, et détériorent la roche selon différents processus et relais de processus, impliquant des formes de recouvrement et des signatures érosives variées sur l'épiderme rocheux (Tab. I-1).

Agents biologiques	Formes de recouvrements et signatures érosives
Bactéries	Encroûtements et patines noireâtres /desquamation désagrégation granulaire
Actinomycètes	Efflorescences blanches / patines
Cyanobactéries	Patines et biofilms de couleurs et consistances variées
Champignons	Taches colorées / desquamation / pitting
Algues	Patines et biofilms de couleurs et consistances variées
Lichens	Encroûtements / taches / pitting
Mousses	Altération chromatique / taches verdâtres à grisâtres
Plantes vasculaires	Fissures / effondrement / détachement

Tab. I-1. Différentes formes de recouvrements et signatures érosives en fonction des agents biologiques à la surface des monuments historiques en milieu tropical (d'après Kumar et Kumar, 1999).

Un certain nombre de travaux ont concerné les problématiques de biodétérioration dans les sites archéologiques mayas du Yucatán, provenant notamment de microbiologistes qui ont utilisé la microscopie électronique, les analyses biochimiques et les cultures d'organismes en laboratoire pour tenter d'attester leur impact sur l'érosion des calcaires monumentaux de la péninsule. García de Miguel *et al.* (1995) ont identifié les cyanobactéries et les mousses comme principaux organismes colonisateurs, les deuxièmes s'appuyant sur la capacité des premiers à fixer l'azote pour croître. Les cyanobactéries seraient alors des organismes pionniers, colonisant également les stucs et les maçonneries en entraînant une détérioration mécanique et en étant également source de nutriments pour certaines espèces de champignons. Ce dernier point est confirmé par la synthèse de Crispim et Gaylarde (2005) sur le rôle des cyanobactéries dans l'érosion de la pierre monumentale. Dans notre secteur d'étude, les travaux d'Ortega Morales *et al.* (2000) et Videla *et al.* (2001) sur les sites de Tulum (en bord de mer des Caraïbes), Uxmal et Kabáh (dans le secteur Puuc au nord-ouest de la péninsule), ont également montré que les cyanobactéries phototrophes de genre *Gloeocapsa* et *Xenococcus* contribuent à la biodétérioration non seulement en solubilisant les carbonates et les précipitant à la surface de la pierre, mais surtout en servant de support à la croissance de champignons producteurs d'acides organiques.

Les champignons jouent en effet un rôle considérable dans la biodétérioration du patrimoine, par leur haute activité enzymatique, mais aussi par leur capacité à coloniser

rapidement un grand nombre de matériaux : pierre, cuir, toile, tissu,… (Sterflinger, 2010). Sur le site d'Uxmal, De la Rosa García *et al.* (2011) ont démontré que les champignons produisent des acides organiques et des métabolites tels que l'anhydrase carbonique pouvant accélérer les processus de dissolution des calcaires. Par ailleurs, en travaillant sur les édifices du site de Chichén Itzá, plus proche de la marge subhumide du Yucatán, Ortega Morales *et al.* (2016) ont souligné la grande diversité des communautés fongiques, avec 53 taxons de champignons identifiés sur des recouvrements biologiques, en insistant sur la nécessité de mieux connaître ces organismes et de mieux évaluer leur impact.

D'autres études menées dans la péninsule du Yucatán ont permis de connaître un peu mieux les mécanismes de biodétérioration à l'œuvre par d'autres organismes. MacNamara *et al.* (2006) ont distingué les communautés bactériennes endolithiques et épilithiques sur le site d'Ek' Balam, en soulignant l'impact de cette distinction sur l'efficacité des processus de dissolution des carbonates. Opalade (2016) a évoqué l'importance de l'orientation des structures et des prédispositions écologiques qu'elle induit sur le développement des assemblages épilithiques de protéobactéries et cyanobactéries sur les sites d'Altun Ha et Xunanthunich au Belize. L'orientation des structures a aussi été évoquée comme facteur principal de la distribution des recouvrements biologiques sur le site de Becán dans le secteur Río Bec par Ortega Morales *et al.* (2013a). En mesurant la radiation solaire reçue par les différentes expositions, ils ont démontré que les biofilms cyanobactériens dominés par *Gloeocapsa* se développent préférentiellement sur les portions de bâti plus ensoleillées, et que l'algue *Trentepohlia* se développe préférentiellement à l'ombre et est associée à un lichen identifié comme *Acanthothecis clavulifera*. Gaylarde *et al.* (2006) avaient déjà étudié cette algue responsable du développement de patines rosâtres, riches en carotène, en tant que biomasse majeure sur les surfaces décolorées d'Edzna et associé sa présence aux formes de *pitting* sur les matériaux de construction.

En somme, les travaux menés sur les recouvrements biologiques en milieu tropical et plus précisément sur les sites archéologiques mayas du Yucatán ont largement prêché en faveur de la biodétérioration des matériaux de construction. Les différents organismes identifiés agiraient par détérioration biophysique (biofilms cyanobactériens, *biopitting* d'origine algal), biochimique (communautés fongiques), et esthétique (décoloration par les biofilms noirs et les patines rosâtres). Il faut néanmoins

garder à l'esprit la coexistence de tous ces organismes dans la plupart des sites archéologiques, parfois même leur association sous forme de consortium végétal, et donc la concomitance des processus d'érosion auxquels ils sont associés. D'autre part, si les travaux présentés jusqu'ici ont amplement souligné les effets délétères de la colonisation biologique, l'appréciation du rôle des organismes a peu à peu évolué, chez un certain nombre d'auteurs, vers un équilibre entre biodétérioration et bioprotection, voire vers un usage de ces recouvrements à des fins de remédiation et de conservation.

3.2. Bioprotection et bioremédiation

Parmi les travaux que nous venons de citer, un certain nombre évoquent un rôle plus nuancé des organismes. En effet, pour García de Miguel *et al.* (1995), lorsque la colonisation est assez développée, elle peut ralentir l'érosion chimique en formant un « tapis biologique » à la surface de la roche. De même, selon Gaylarde *et al.* (2006), la haute teneur en carotène qui solidifie les biofilms algaux dominés par *Trentepohlia* sont susceptibles de protéger la roche des stress thermiques. Enfin, les oxalates produits par les communautés fongiques étudiées à Chichén Itzá par Ortega Morales *et al.* (2016) pourraient également constituer une couche protectrice limitant les agressions environnementales. L'idée que les recouvrements biologiques peuvent, dans certains cas, protéger les matériaux de construction n'est pas récente, mais a eu du mal à émerger dans un contexte où ils sont souvent considérés comme exclusivement néfastes par les acteurs de la conservation des monuments, ainsi que sous la plume d'une grande majorité de microbiologistes. Pourtant, dès les années quatre-vingt-dix, Ariño *et al.* (1995) avaient évoqué le rôle protecteur des lichens dans un environnement agressif sur les pavés de l'ancien forum romain de Cadix en Espagne, et les synthèses actuelles montrent bien le changement de paradigme qui s'opère. Pour Pinna (2014), les biofilms réduisent l'intensité des échanges entre la roche et l'atmosphère, et le nettoyage chimique ou mécanique des organismes a des effets bien plus délétères que les organismes eux-mêmes. Elle plaide par ailleurs pour que la recherche dans le domaine aille au-delà des simples travaux d'identification de longues listes d'espèces et que les protocoles se standardisent afin de progresser dans l'évaluation de l'impact des recouvrements biologiques. Pour Gadd et Dyer (2017), les lichens et autres organismes sont clairement protecteurs et ils parlent même d' « heureux accident », malgré les incertitudes qui demeurent sur la réaction de certaines espèces avec différents substrats. Pour ces auteurs, les acides oxaliques produits par les lichens, hautement insolubles,

peuvent combler la porosité et réduire la perméabilité de la roche, entre autres mécanismes de protection résumés sur la figure I-8.

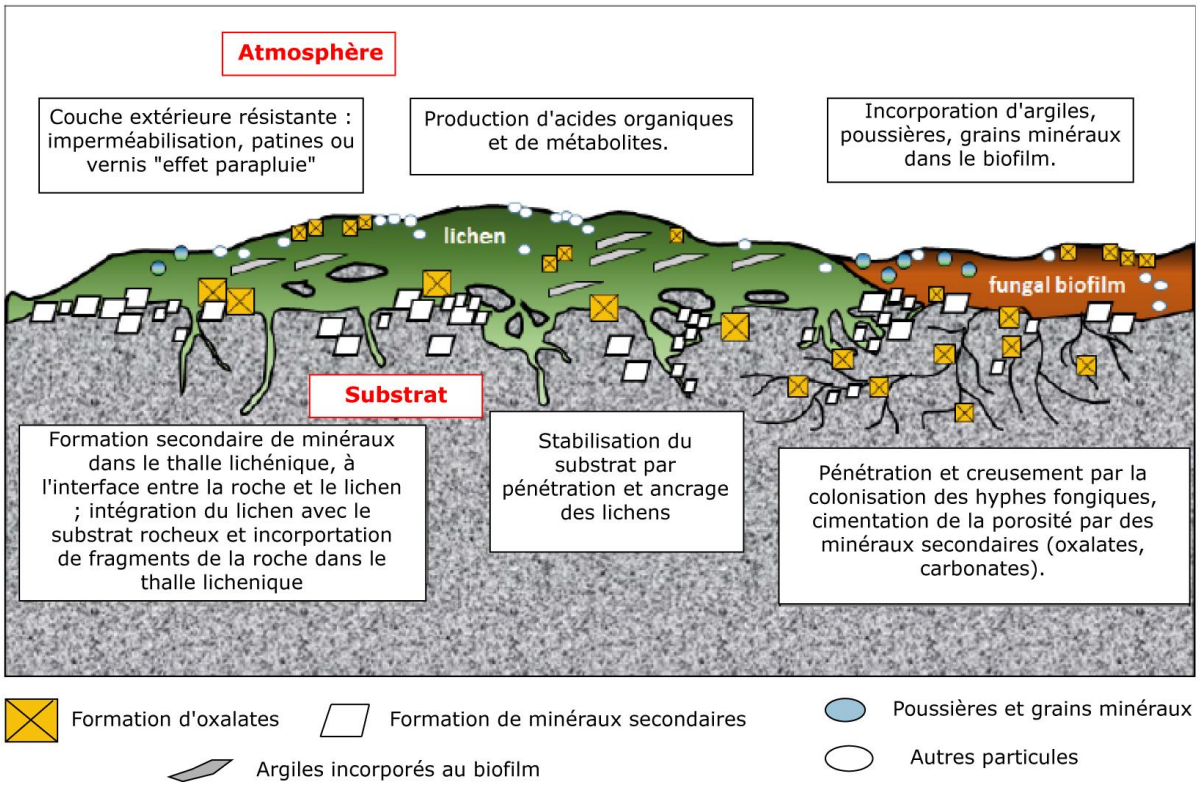


Fig. I-8. Différents mécanismes de protection de la roche par les biofilms (modifié et traduit d'après Gadd et Dyer, 2017).

Dans ce sens, Burford *et al.* (2006) avaient déjà suggéré, à la suite de cultures de champignons sur des substrats calcaires en milieu contrôlé, que ces organismes pouvaient jouer un rôle bien plus important que ce qui était auparavant apprécié dans le cycle biogéochimique du carbone. Par ailleurs, Gonzales Gomes *et al.* (2018) ont, dans le sillage de l'identification des communautés fongiques par Ortega Morales *et al.* (2016) souligné le potentiel de biominéralisation de ces organismes par la sécrétion des oxalates. L'usage de certains agents biologiques pour la bioremédiation des matériaux de construction détériorés a été considéré par Webster et May (2006) comme une alternative viable aux interventions chimiques, sur la base d'un grand nombre d'études. Les bactéries, notamment les myxobactéries, ont montré leur potentiel de biominéralisation et l'opportunité que celui-ci constitue dans une optique de conservation de la pierre monumentale (Jimenéz Lopéz, 2007 ; Rodriguez Navarro, 2012). De même, les cyanobactéries, par leurs interactions avec des bactéries hétérotrophes sont les principaux organismes ayant contribué à la production des roches carbonatés depuis 3,5 milliards d'années (Altermann *et al.,* 2006). Leur rôle de biocatalyseur de la

minéralisation des carbonates par conversion du CO2 a été longuement discuté par Kamennaya *et al.* (2012), modélisé en laboratoire avec des cyanobactéries du genre *Gloeocapsa* par Bundeleva *et al.* (2014), et observé par microscopie électronique (Fig. I-9). Deux mécanismes se produisent alors : la précipitation inorganique de calcite sous forme de cristaux rhomboédriques, et la précipitation organique sous forme de globules de la forme des capsules des cellules bactériennes, structurées en nids d'abeilles.

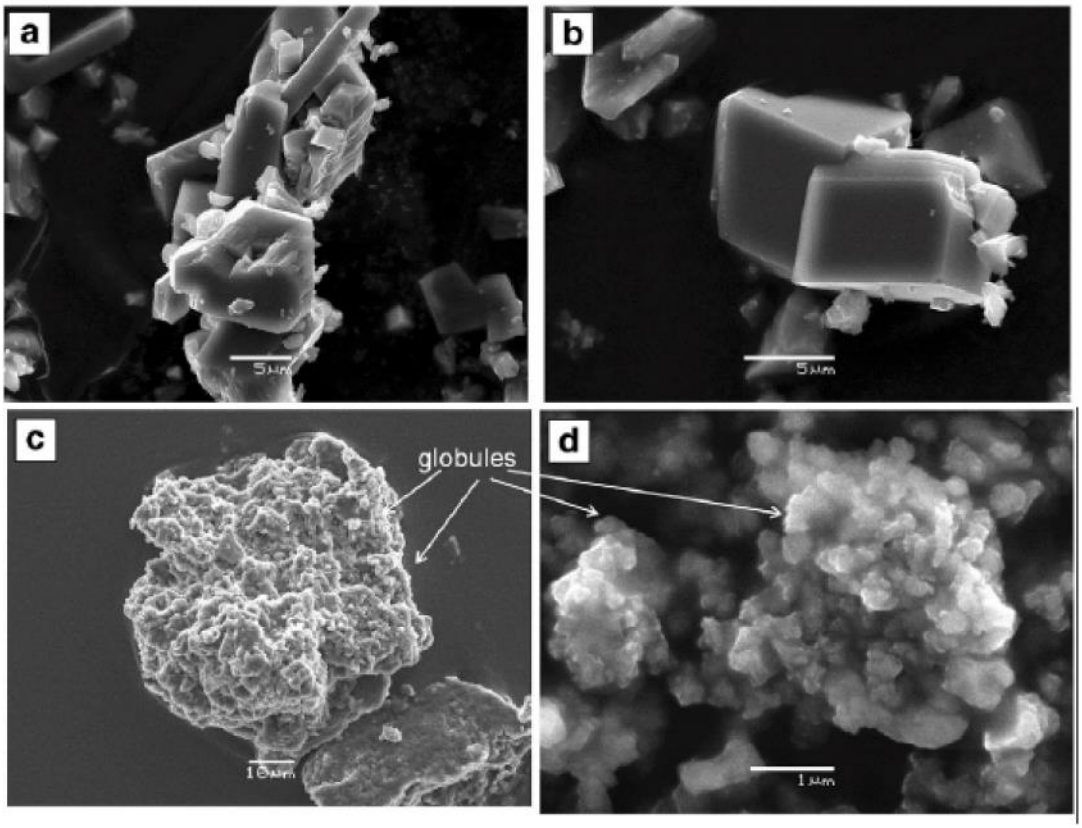


Fig. I-9. Biominéralisation des carbonates par cyanobactéries de genre *Gloeocapsa* en milieu contrôlé abiotique (a et b) et biotique (c et d) (Bundeleva *et al.* 2014).

En somme, l'appréciation du rôle des organismes à la surface de la pierre monumentale est très contrastée. Entre biodétérioration, bioprotection et bioremédiation, les paradigmes tendent à évoluer vers une appréciation plus équilibrée, même si celle-ci dépend largement des disciplines scientifiques et des courants de pensée. En effet, un acteur de la conservation qui a la charge d'un monument entièrement recouvert de lichens ne prêchera pas pour la bioprotection et préférera voir ces recouvrements comme destructeurs. De même, un microbiologiste spécialiste des mécanismes de biodétérioration a tout intérêt à ce que les organismes soient considérés comme néfastes afin de trouver des enjeux et des applications directes à ses travaux. En

ce qui nous concerne, il conviendra de ne pas occulter l'aspect néfaste des recouvrements biologiques tout en envisageant de manière rationnelle et prudente les effets bénéfiques qui ont été démontrés par la communauté scientifique. Enfin, on retiendra également que la distribution des organismes à la surface de la roche et leur vitesse de colonisation peuvent également être influencées par des interventions humaines, comme dans le cadre de déboisement aux environs immédiats du site de Tikal où les structures restées sous forêt ont conservé leurs recouvrements biologiques (García de Miguel *et al.,* 1995). Sur le même site, Ortega Morales *et al.* (2013b) ont suggéré une réévaluation de l'impact des toits de palme qui, s'ils protègent les stucs ornementaux des agressions climatiques, induisent également leur colonisation par des agents biologiques dont les effets sont bien plus délétères. Ce constat nous rappelle que les interventions humaines sont susceptibles d'agir en tant que forçage anthropique sur un système d'interactions entre facteurs de contrôle intrinsèques (les caractéristiques des matériaux de construction) et extrinsèques (les paramètres climatiques et la colonisation biologique).

4. Forçage anthropique induit par les interventions humaines

Longtemps limitées à l'effet de la pollution atmosphérique sur les monuments historiques dans la littérature, les interventions humaines sont en réalité susceptibles d'avoir un spectre de conséquences bien plus large. L'érosion de la pierre monumentale est même, selon Gomez-Heras et McCabe (2015), une entrée intéressante pour l'étude de la notion d'Anthropocène développée par Crutzen (2002) dont le point de départ et les marqueurs sont aujourd'hui encore débattus (Lewis et Maslin, 2015). Sans pour autant l'associer à ce concept qui ne fait pas encore consensus, l'impact des interventions humaines sur l'érosion du patrimoine bâti peut néanmoins s'insérer dans les problématiques du changement global. En effet, outre le fait que le changement climatique actuel, largement imputé aux activités humaines, a des conséquences sur l'érosion de la pierre monumentale par la modification des paramètres climatiques de l'échelle globale à locale, l'interventionnisme croissant des acteurs de la conservation des monuments rentre dans cette thématique du changement global. Ces interventions, de plus en plus fréquentes et intensives depuis le XIXe siècle, sont susceptibles d'avoir des effets délétères sur les monuments historiques. Nous choisirons de classer en deux catégories : les interventions directes sur le bâti et les matériaux de construction, et les interventions indirectes sur l'environnement dans lequel les monuments s'inscrivent.

4.1. Interventions directes

Les interventions directes sont avant tout la cause d'une hétérogénéisation du bâti pouvant conduire à une détérioration consécutive à l'incompatibilité des matériaux et à la modification de la circulation de l'eau et de l'air au sein de la pierre. En effet, l'introduction de ciments, mortiers ou enduits, opération courante en raison de leur durabilité moindre par rapport aux pierres de construction, a pu conduire par leur incompatibilité à une accélération de l'érosion de ces dernières. Cette détérioration accélérée a pu être constatée par Pavia et Bolton (2001) et Dotter *et al.* (2009) sur les monuments irlandais, et par Wedekind (2005) sur les grès de Petra (Jordanie), dans les deux cas consécutive à l'application de joints ou de mortiers à base de ciment. Ces mélanges peuvent également contenir des éléments ferrugineux et entraîner une oxydation de ces derniers à la surface de la pierre, comme cela a été constaté sur les bas-reliefs de Borobudur en Indonésie (Hyvert, 1973). Ils peuvent également être source de sels solubles et accélérer la détérioration des matériaux de construction (O'Brien *et al.*, 1995), ou encore réagir avec les polluants atmosphériques (Smith *et al.*, 2010). André *et al.* (2014) ont proposé un essai de quantification de l'érosion pré- et post-rejointoiement des grès de l'église Saint-Marc de Souvigny (Allier) par lasergrammétrie. Les résultats suggèrent un décuplement de la vitesse de recul du parement depuis le rejointoiement (Fig. I-10).

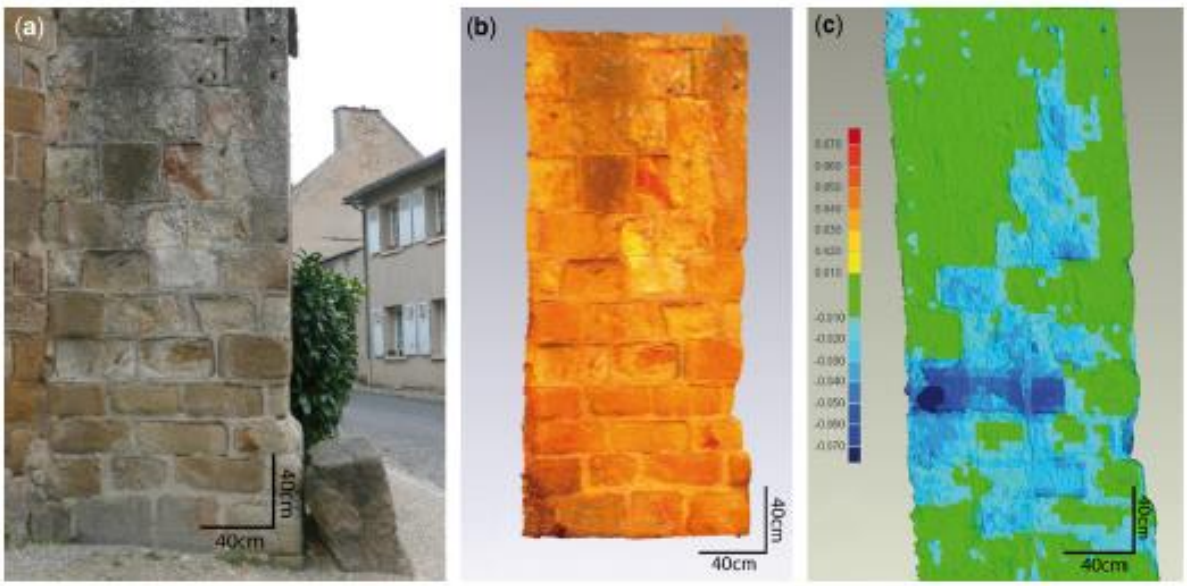


Fig. I-10. Modélisation de la récession de surface des grès de l'Église Saint-Marc de Souvigny (Allier) par André *et al.* (2014). (a) photographie (b) modèle en trois dimensions construit par relevé LiDaR (c) Cartographie de quantification de l'érosion post-rejointoiement.

L'hétérogénéisation du bâti passe aussi par le remplacement de pierres dont la disponibilité est devenue un problème pour les acteurs de la conservation, en raison de la fermeture des carrières d'origine (Doehne et Price, 2010). Si la « durabilité » de la pierre pourrait présider à la sélection des pierres de remplacement, celles-ci sont souvent choisies sur la base de critères esthétiques (similarité aux pierres d'origine) ou économiques (faible coût). La différence entre la théorie et la pratique a été montrée par Quist (2009) sur deux campagnes de restaurations successives de Notre-Dame de Breda aux Pays-Bas, incluant des remplacements de pierre. Toutefois, l'insertion d'une pierre non compatible n'est pas sans risque pour le monument, comme il l'a été démontré par André *et al.* (2012a) sur l'église Saint-Sébastien de Manglieu (Puy-de-Dôme) où un granite gris a été choisi pour remplacer un gneiss gris d'origine lors des restaurations du XIXe siècle. Par ses propriétés (pierre plus compacte et peu poreuse), le granite inséré à la base du monument a créé un véritable plancher où se bloquent les eaux d'infiltration qui remontent par capillarité dans les gneiss médiévaux, ce qui a conduit à une accélération de leur érosion (Fig. I-11).

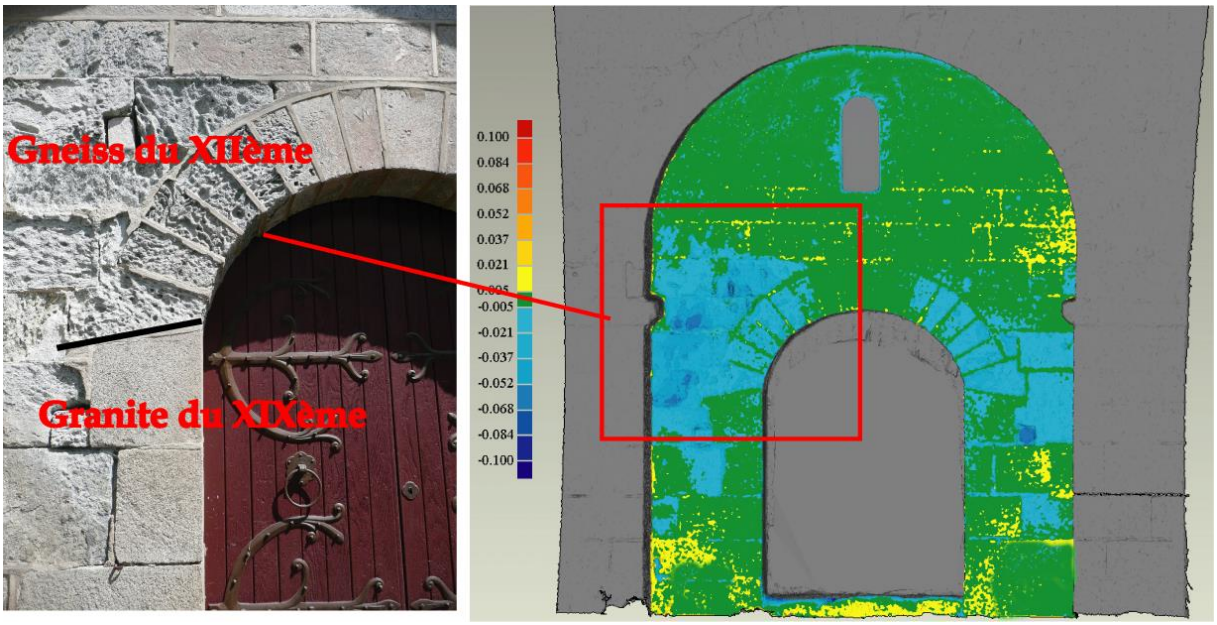


Fig. I-11. Mise en évidence par lasergrammétrie de l'érosion accentuée des gneiss médiévaux après l'insertion de granites incompatibles au XIXe siècle (André *et al.*, 2012a.).

Enfin, le nettoyage des pierres peut constituer la plus visuellement dramatique des actions auxquelles un édifice peut être sujet en raison des changements fondamentaux qu'il cause dans l'apparence, la structure de la pierre et des dommages permanents et irréversibles qu'il peut induire (Maxwell, 1992 ; Doehne et Price, 2010). Aucune technique de nettoyage n'est inoffensive pour la pierre. Le nettoyage mécanique

endommage l'épiderme rocheux et accélère sa détérioration en laissant la roche à nu et ses grains prêts à être pris en charge par les processus de désagrégation. Le nettoyage chimique a des résultats variables dans son efficacité, et ses effets à long terme sont incertains et relèvent d'une combinaison de facteurs complexes qui les rendent difficile à évaluer (Maxwell, 1992). De nombreuses études ont mis en évidence les dommages causés par le nettoyage des pierres par simple observation macroscopique : perte de matière en surface, taches, dépôts de sels, pierre rendue plus vulnérable aux attaques biologiques (Doehne et Price, 2010). Les mécanismes à l'œuvre dans l'accélération de la détérioration post-nettoyage sont bien connus, les résidus chimiques entraînent des formes diverses de météorisation par cristallisation des sels, le nettoyage abrasif quant à lui, en augmentant la porosité de la pierre, la rend plus vulnérable à l'action de l'eau (Young *et al.*, 2000). Enfin, Franzoni *et al.* (2018) ont également démontré l'impact environnemental néfaste des solvants utilisés dans les nettoyages chimiques lors des chantiers de restauration.

4.2. Interventions indirectes

La pollution atmosphérique a toujours été et continue d'être considérée comme la principale intervention humaine indirecte ayant des effets néfastes sur la pierre monumentale (voir à ce sujet la section 2.1. du présent chapitre, p. 30). Cependant, Bonazza *et al.* (2009) ont suggéré que le changement climatique actuel allait, avec la hausse du CO2 atmosphérique, augmenter le potentiel de karstification des matériaux calcaires au cours du XXIe siècle, au point de dépasser la détérioration due aux pluies acides et à la pollution. Pourtant, même si le lien entre le changement climatique actuel et les processus de détérioration est évident au niveau qualitatif, la quantification de l'accélération de l'érosion d'une portion de bâti individuelle par rapport à des variations globales des paramètres climatiques reste difficile à prédire et à évaluer (Viles, 2002). Au-delà du changement climatique, c'est plutôt l'impact de la pression touristique et celui des interventions humaines motivées par les enjeux de conservation des monuments qui ont intéressé les travaux menés sur ces problématiques.

En effet, l'impact de la pression touristique sur les sites très visités est bien réel, notamment en raison de la modification des paramètres microclimatiques à l'échelle du site. Paradise (2005) a démontré la corrélation entre le nombre de visiteurs et le taux

d'humidité relative dans la chambre d'Al Khazneh (Petra, Jordanie) par monitoring climatique (Fig. I-12), ainsi que l'impact abrasif du contact des visiteurs avec les matériaux de construction en grès. De même, la pression touristique est à l'origine de la « maladie verte » des grottes de Lascaux ; les visiteurs produisent du gaz carbonique et de la vapeur d'eau dans les espaces clos et apportent de la matière organique par leurs vêtements (Lefèvre, 1974). Ces apports extérieurs ont fait basculer l'équilibre microclimatique du site et engendré une colonisation biologique incontrôlable, qui a conduit à la reconstruction de la grotte sur un autre site.

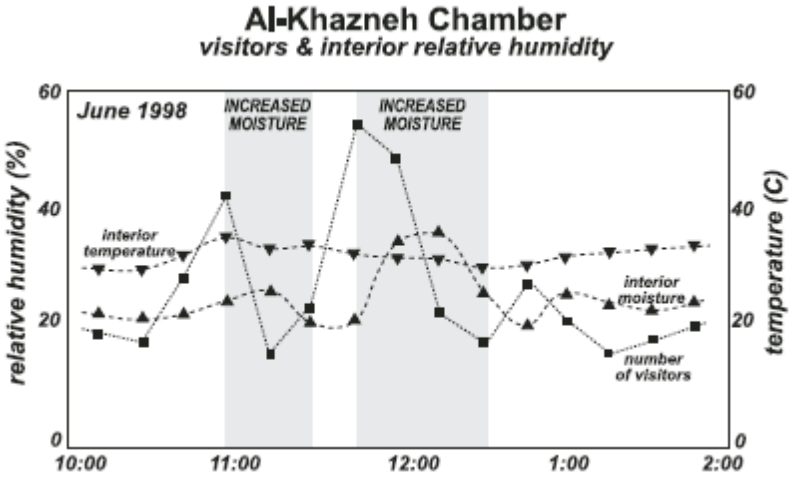


Fig. I-12. Corrélation entre le nombre de visiteurs et l'humidité relative dans la chambre d'Al-Khazneh à Pétra, Jordanie (Paradise, 2005).

Par ailleurs, l'environnement immédiat dans lequel le monument s'inscrit joue un rôle prépondérant dans les modalités de sa détérioration. La topographie du site, son exposition au soleil, à la pluie et aux vents dominants conditionnent les facteurs extrinsèques d'érosion à l'échelle microclimatique. La présence de végétation, qui a souvent été considérée comme destructrice, et ce notamment en milieu tropical, semble *a contrario* pouvoir jouer un rôle protecteur. En effet, la déforestation aux alentours des sites d'art rupestre en Afrique du Sud a contribué à l'accélération de leur détérioration par la modification des paramètres de l'ambiance climatique, et notamment de l'ombrage que procuraient les arbres (Hall *et al.*, 2007). De même, par la comparaison avec des photographies anciennes (Fig.I-13), l'accélération de l'érosion des temples d'Angkor (Cambodge) consécutive à leur dégagement de la forêt tropicale a pu être mise en évidence (André *et al.,* 2008, 2011).

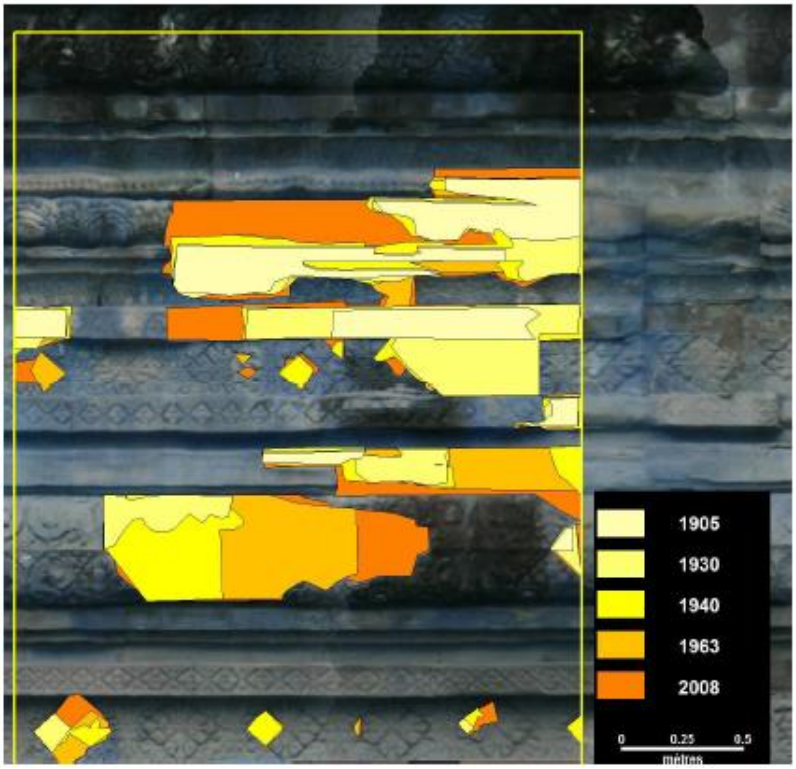


Fig. I-13. Mise en évidence des périodes d'érosion accélérée par photogrammétrie diachronique. Temple de Ta Keo, Angkor, Cambodge. (André *et al*., 2011).

Ce passage d'un régime de biodétérioration lente sous forêt à un régime de désagrégation mécanique rapide lorsque le monument est directement exposé aux stress environnementaux a été mis en évidence par André *et al.* (2012b) sur la base de l'utilisation d'une échelle visuelle de détérioration chimique et mécanique des pétales de lotus en grès (Fig. I-14) couplée à des données issues du monitoring climatique sous forêt et à l'air libre qui ont permis la comparaison des deux ambiances climatiques (Fig. I-15).

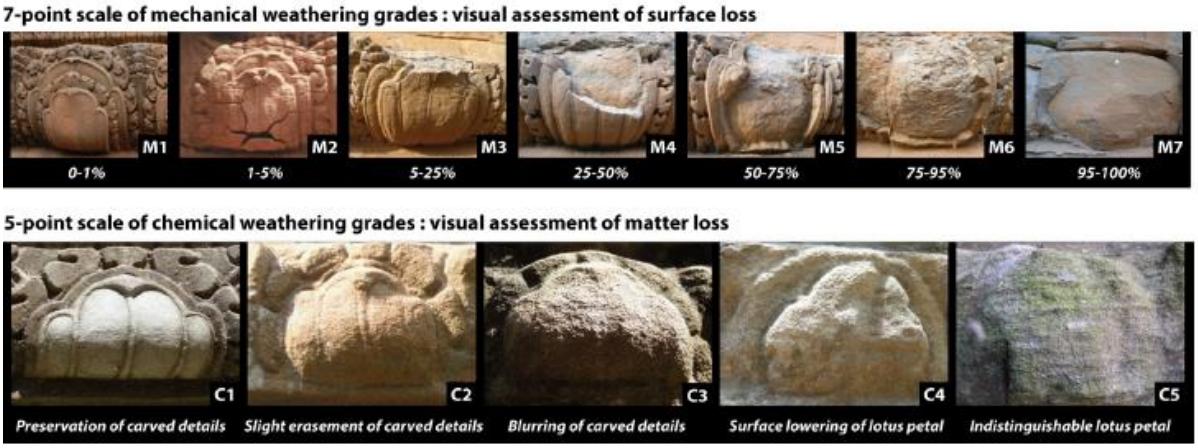


Fig. I-14. Echelles visuelles de détérioration mécanique et biochimique des pétales de lotus de Ta Keo à Angkor, Cambodge (André *et al.,* 2012b).

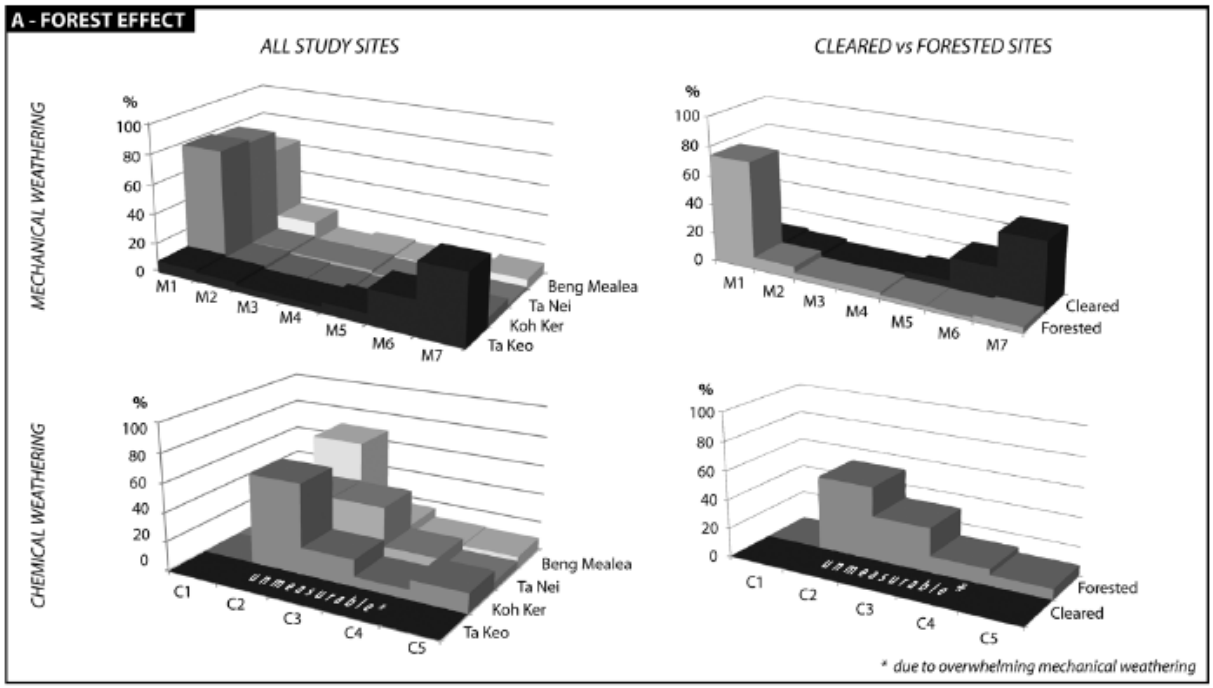


Fig. I-15. Résultats de l'application des échelles visuelles de détérioration à la comparaison des sites sous forêt et à l'air libre. Angkor, Cambodge (André *et al.*, 2012b).

En somme, les interventions humaines sur les monuments historiques peuvent largement être considérées comme un forçage anthropique sur un système fondé sur les facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques. En effet, les interventions directes telles que les opérations de restauration sont susceptibles de modifier les propriétés des matériaux – notamment la porosité et la perméabilité – ainsi que la composition chimique des éléments constitutifs du bâti – introduction de sels solubles – mais également la morphologie des monuments, et donc le système de pentes sur lequel agissent les processus érosifs. Les interventions indirectes, quant à elles, modifient plutôt les paramètres bioclimatiques dans lequel les matériaux s'inscrivent, induisant des variations de l'agressivité des stress atmosphériques et de l'intensité de la colonisation biologique et des processus qui lui sont associés, que ces derniers détériorent ou protègent la roche.

Au final, il convient également de souligner que les travaux menés sur l'impact de ces interventions sur l'érosion de la pierre monumentale se limitent essentiellement aux effets de la pollution. Si leur rôle est parfois évoqué en tant que facteur d'accélération de la détérioration, les études visant à quantifier cet impact dans des contextes bioclimatiques tropicaux et sur des matériaux carbonatés sont inexistantes. En effet, les seuls travaux qui ont été menés sur le secteur Río Bec viennent de l'ENCRyM (*Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía)* et soulignent la détérioration

importante des matériaux de construction du secteur en l'attribuant principalement à la présence de gypse, source de sels solubles, dans la stratification locale (García Solis et Valencia Pulido, 1997 ; Anrubio Vega, 1998). Pourtant cette hypothèse a été rejetée par Straulino *et al.* (2013), qui l'attribueraient plutôt à l'attaque de la micrite par des processus de dissolution et de recristallisation dus aux alternances d'humectation et de dessiccation de la roche. Des efforts de caractérisation des facteurs de durabilité des matériaux et des formes et intensités de détérioration ont été menés par Straulino (2012), et Straulino *et al.* (2013) sur le site éponyme de Río Bec, en préalable à une proposition de conservation des éléments iconographiques en utilisant le fluorure de sodium. En revanche, l'impact des interventions humaines n'a jamais été évalué, et encore moins quantifié, dans ce secteur où les fouilles archéologiques et les opérations de restauration ont été particulièrement intenses depuis les années quatre-vingt.

Conclusion du chapitre 1

A travers cet état de l'art de l'érosion des calcaires monumentaux en contexte tropical, nous avons d'abord cherché à nous inscrire dans la continuité d'une approche développée par les géomorphologues dans les années deux-mille. Cette approche est avant tout systémique et nous invite à réfléchir aux interactions entre facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques, et à la manière dont les interventions humaines peuvent agir en tant que forçage sur le jeu de ces facteurs de contrôle.

La détérioration des matériaux de construction carbonatés a été étudiée dans une somme de travaux importante qui se sont articulés autour de l'impact de la pollution atmosphérique et du milieu urbain, mais aussi des transferts hydriques et de la cristallisation des sels à la surface de ces roches calcaires. Ces dernières sont très communes mais également peu durables car particulièrement sensibles aux processus chimiques comme mécaniques, et font donc l'objet de la majorité des travaux scientifiques menés dans cette thématique.

Par ailleurs, l'appréciation du rôle des organismes, dont la croissance et la subsistance est largement favorisée par le contexte tropical, reste un élément clé de ce travail. C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas occulter l'impact délétère que ces derniers peuvent avoir tout en restant ouvert à l'évolution du paradigme incluant maintenant la bioprotection et la biorémédiation.

Enfin, nous avons fait le point sur l'impact des interventions humaines et sommes peu à peu arrivés à la conclusion qu'aucun travail n'a été mené sur l'évaluation de leur impact sur des matériaux calcaires en contexte tropical. Avec la prise en compte de plus en plus importante des conséquences du changement global dans une grande variété de domaines, l'impact de ces interventions sur l'érosion de la pierre monumentale constitue une entrée intéressante pour souligner l'omniprésence des forçages anthropiques sur des systèmes commandés à la base par des facteurs de contrôle essentiellement naturels.

Chapitre II

Des ruines mayas du secteur Río Bec : environnement physique et contexte archéologique

> *« Car un des traits les plus frappants de la forêt [tropicale] est qu'elle semble immergée dans un milieu plus dense que l'air ; la lumière ne perce que verdie et affaiblie, et la voix ne porte pas. »*
>
> Claude LEVI-STRAUSS, *Tristes Tropiques*, 1955.

Entreprendre l'étude de la détérioration d'une sélection de monuments historiques implique une double nécessité. D'une part, celle de s'ancrer dans la réalité physique dans laquelle s'inscrivent ces monuments, cette dernière définissant les caractéristiques des facteurs de contrôle responsables de leur érosion. D'autre part, celle d'en dégager les principaux aspects architectoniques (*i.e.* qui concernent l'architecture en tant que science et technique de la construction) et archéologiques, afin de souligner la valeur patrimoniale des monuments étudiés. Nous nous attacherons donc à décrire successivement l'environnement physique dans lequel les monuments étudiés ont évolué, le contexte archéologique qui justifie leur valeur patrimoniale, et les motivations qui ont présidé à la sélection des sites archéologiques retenus.

La principale difficulté de l'exercice réside dans le changement d'échelle spatiale et temporelle nécessaire à la présentation de ces deux aspects, géographique et archéologique. En effet, le temps est révolu où l'on considérait la civilisation maya comme un bloc monolithique dans lequel rien d'important n'avait changé au cours des siècles. Si l'on avait pour habitude de ne voir que des continuités entre périodes et régions, il n'est plus possible de fermer les yeux sur les ruptures qui ont défini des rythmes d'évolution propres à chacune des différentes régions culturelles. Ces dernières correspondent dans une large mesure à des

zones écologiques, sans que ces correspondances ne donnent pour autant lieu à un déterminisme géographique (Baudez, 2009). Les sociétés mayas, dont la complexité et la variété est soulignée par l'organisation des centres urbains et l'élaboration des différents styles architecturaux, ont connu une histoire longue et diversifiée au cours de laquelle les relations avec le milieu physique ont occupé une place essentielle. Au sein de cette mosaïque de sociétés – plus organisées sur le modèle politique des cités grecques de l'Antiquité avec une ville centrale rayonnant sur un territoire que sous la forme d'un empire structuré par une unité politique et culturelle – le secteur Río Bec est rattaché à un style architectural propre correspondant à une époque précise (Fig. II-1), celle du Classique Récent (600-900 après J.-C.), et s'inscrit dans un milieu particulier, celui des Basses Terres Centrales (Arnauld *et al.*, 2014).

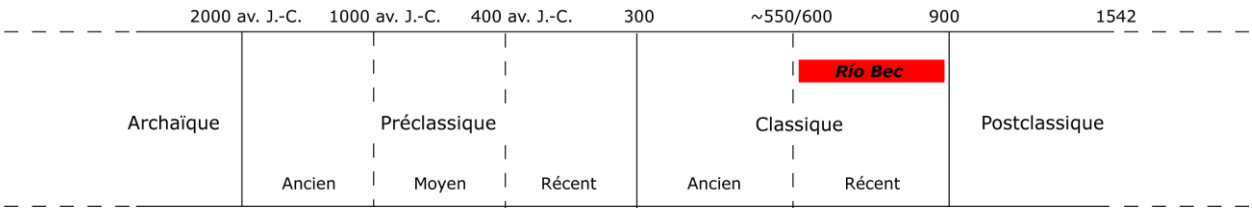


Fig. II-1. Cadre chronologique le plus largement accepté de la civilisation maya (modifié d'après Demarest, 2004), en rouge la période de développement du style Río Bec.

Dans un premier temps, nous nous attacherons à situer cette région des Basses Terres Centrales au cœur de la péninsule du Yucatán en insistant sur les aspects géologiques et bioclimatiques de ces espaces emboîtés. Dans un second temps, nous entreprendrons la caractérisation du style Río Bec, tant dans ses aspects architectoniques que dans ce qu'ils traduisent du point de vue sociopolitique, et dans ce qui est connu de la période au cours de laquelle il apparaît et existe dans les Basses Terres Centrales. Enfin, nous présenterons dans un troisième temps les sites archéologiques qui ont été sélectionnés pour mener ce travail.

1. Les Basses Terres Centrales, au cœur de la péninsule du Yucatán

Le secteur Río Bec s'inscrit dans l'aire culturelle de la civilisation maya, une des nombreuses cultures de la Mésoamérique précolombienne, qui s'est développée dans la

péninsule du Yucatán, au sud-est du Mexique. Baignée par le golfe du Mexique à l'ouest et la mer des Caraïbes à l'est, la péninsule du Yucatán est un vaste plateau calcaire de 300 km de long sur 250 km de large dont l'altitude s'élève graduellement de la côte caraïbe vers l'intérieur des terres, ne dépassant que rarement 50 m avant le vallonnement karstique des Basses Terres Centrales qui occupent l'espace médian de cette péninsule. Du point de vue écologique et culturel, l'aire culturelle maya se subdivise, de manière assez arbitraire et selon les auteurs, en plusieurs régions correspondant à des zones géographiques distinctes (Fig. II-2).

Fig. II-2. La péninsule du Yucatán et ses différentes régions écologiques et culturelles.

Du nord au sud, on trouve : les Basses Terres du Nord, grande plaine calcaire au climat plus sec, où se développent les cités mayas du Classique récent et terminal (800-1000 apr. J.-C.) et du Postclassique (900/1000-1542 apr. J.-C.) ; les Basses Terres Centrales, où la forêt tropicale, plus dense qu'au nord, a vu l'éclosion de l'architecture monumentale à la période classique (300-900 apr. J.-C.). Puis la région du Pétén, où la forêt, plus dense encore, a hébergé l'importante cité de Tikal. Au sud, les Hautes Terres métamorphiques précèdent une chaîne volcanique récente et encore active, qui domine à plus de 4000 m une étroite bande côtière Pacifique où apparurent les premières sociétés complexes au Préclassique ancien (2000-1000 av. J.-C.). Au sein des Basses Terres Centrales, la région à laquelle correspond le style Río Bec est située à mi-chemin entre les sites archéologiques de Calakmul et Dzibanché qui furent les deux capitales successives de la dynastie Kaan, rivale des souverains de Tikal (Fig. II-3), et regroupe plusieurs dizaines d'ensembles de structures partageant les mêmes caractéristiques architectoniques et stylistiques.

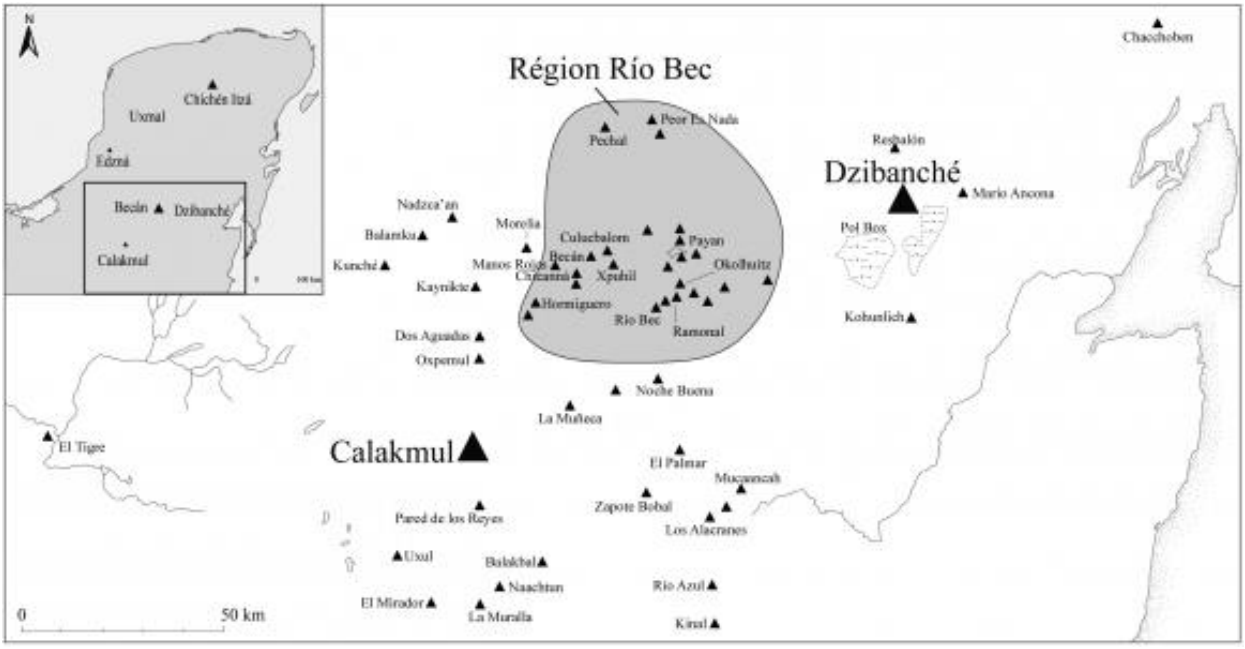


Fig. II-3. Délimitation locale de la région Río Bec (Nondédéo *et al*, 2010).

Si les aspects archéologiques du secteur étudié, qui définissent largement le style Río Bec, seront résumés plus loin, il convient, dans un premier temps, de présenter le contexte géologique et bioclimatique des Basses Terres Centrales.

1.1. Contexte géologique et géomorphologique

Le contexte géologique de la péninsule du Yucatán est relativement bien connu grâce aux travaux menés en raison de son potentiel en hydrocarbures. L'intérêt des géologues s'est donc porté sur cette entité géologique parfois appelée « bloc maya » dès les années soixante (Butterlin et Bonnet, 1963 ; López Ramos, 1973 ; Weidie, 1976). Plus récemment, plusieurs auteurs dont Padilla y Sánchez (2007) se sont intéressés aux mouvements tectoniques qui ont bouleversé l'Amérique Centrale, et particulièrement l'évolution de la péninsule yucatèque. Le karst du Yucatán a également fait l'objet d'une étude approfondie par Héraud-Piña (1996). La description du contexte géologique et géomorphologique qui sera entreprise dans cette partie tentera d'aller à l'essentiel pour caractériser le plus efficacement possible les gisements rocheux dont ont été extraits les matériaux de construction du secteur Río Bec. Nous commencerons donc par replacer les Basses Terres Centrales dans le cadre géologique général de la péninsule yucatèque, avant de nous intéresser plus particulièrement aux formations superficielles spécifiques au secteur étudié, pour faire enfin un point sur le relief, les sols et le réseau hydrographique local.

1.1.1. Cadre géologique général de la péninsule du Yucatán

La péninsule du Yucatán est une plate-forme calcaire essentiellement cénozoïque, partiellement émergée et bordée par un large plateau continental (Perry *et al.*, 2003). La région devient pratiquement stable à la fin du Secondaire, avant que les événements tectoniques du Tertiaire ne se traduisent par un soulèvement de la plate-forme déjà émergée. A partir de là, la péninsule évolue au gré des régressions et transgressions marines, et des processus associés de sédimentation des évaporites et carbonates. Elle acquiert sa configuration actuelle à la fin du Pliocène lors de l'émersion définitive des régions constituées de calcaires et de marnes néogènes (Padilla y Sánchez, 2007). Les sédiments quaternaires couvrent les plaines côtières et pénètrent à l'intérieur des terres au nord de la péninsule (Héraud-Piña, 1996). La composition géologique de la péninsule est ainsi dominée par les carbonates et les évaporites précipités depuis le Crétacé moyen (Lopez Ramos, 1973), induisant une stratification en séquences calcaires quasiment horizontales (Fig. II-4). Malgré cette histoire géologique apparemment paisible, la plate-forme yucatèque

a été bouleversée par d'importants mouvements tectoniques (Padilla y Sánchez, 2007) et par l'impact de Chicxulub, provoqué par un astéroïde de 10 km de diamètre qui a frappé la Terre il y a 66 millions d'années, marquant la fin de l'ère secondaire et l'extinction massive Crétacé-Tertiaire (Pope *et al.*, 1994).

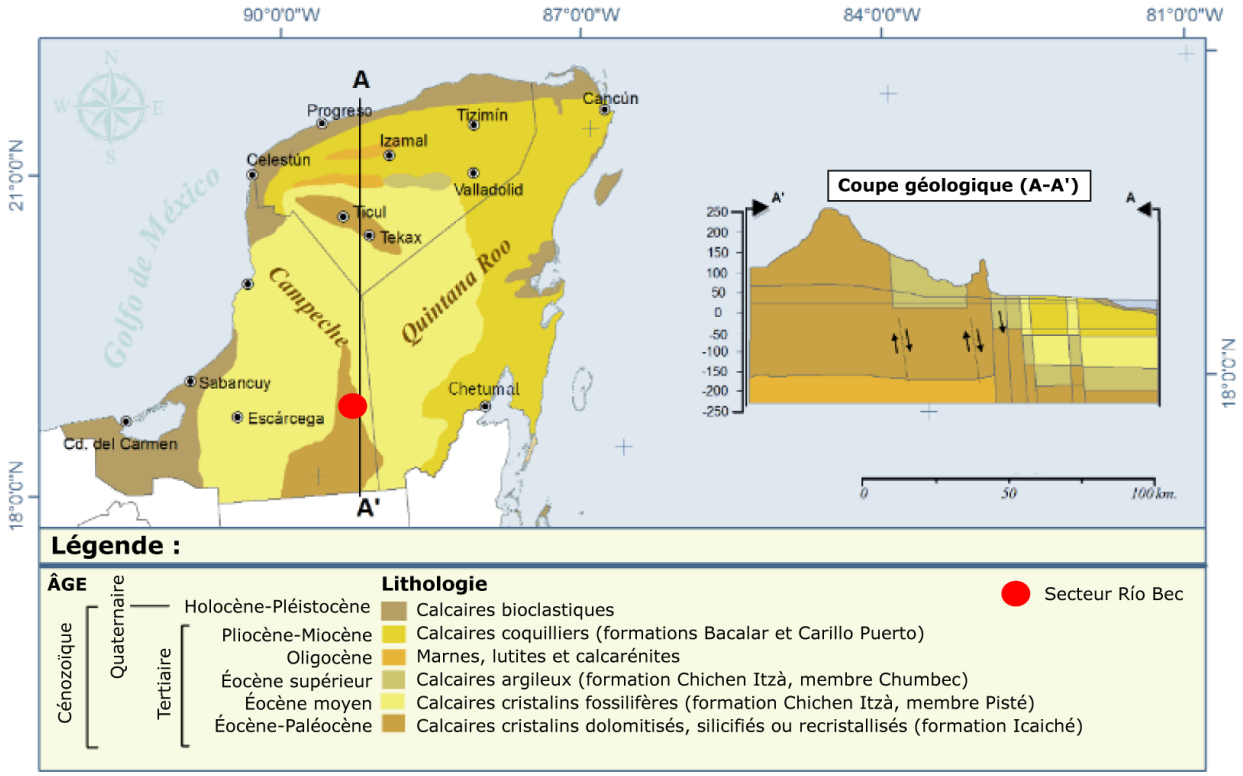


Fig. II-4. Stratification des séquences calcaires de la péninsule du Yucatán (modifié et traduit d'après Durán et Méndez, 2010).

Au sein de cette déclinaison de lits calcaires d'âges différents, le secteur Río Bec se situe à proximité des affleurements nord de la formation Icaiche, plus précisément sur la formation Xpuhil (Straulino, 2012). Cette dernière est constituée de séquences calcaires microcristallines, de texture *mudstone*, stratifiées, allant des faciès limoneux aux lutites, et comprenant des dépôts de gypse et d'anhydrite. La formation Icaiche est, quant à elle, composée d'une séquence de calcaire bien stratifiée et occasionnellement massive, de texture *mudstone*, avec de rares fragments de silice colloïdale et de halite (Castro Mora, 2002).

Au-delà de cette classification générale, il convient de préciser qu'en raison des propriétés fondamentales des roches calcaires (solubilité des carbonates, aptitude du réseau

poreux à laisser circuler les fluides) et de l'agressivité de l'environnement chaud et humide, le sommet de la pile sédimentaire, concerné par les extractions des matériaux de construction des sites archéologiques du Río Bec, a connu un certain nombre d'altérations superficielles.

1.1.2. Les formations superficielles du secteur Río Bec

Les matériaux de construction qui ont servi à l'édification des structures du secteur Río Bec ont été en grande majorité extraits des formations superficielles locales. Les différents rapports du projet Río Bec (Michelet *et al.,* 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 et 2009) indiquent effectivement la présence d'un grand nombre de sites d'extraction aux alentours et au sein même du site éponyme, et les rapports de restauration de Becán (Hernandez Hernandez, 1983 ; Piña Chan, 1983 ; Suárez Aguilar, 2009) et de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983) mentionnent la provenance locale des pierres à bâtir utilisées par les constructeurs originels. Ces derniers les ont extraites des formations superficielles qui dominent la région, appelées de haut en bas *sascab*, et *laja* ou *caliche,* ces appellations étant sujettes à un flou terminologique relatif et à un usage très divers selon les auteurs, qui ne désignent par ces appellations que des catégories de matériaux. L'examen lithostratigraphique des carrières de construction du site éponyme de Río Bec entrepris par Gillot (2018) lève cependant le voile sur ces imprécisions et permet de disposer d'une caractérisation fine des séquences calcaires dans lesquelles les constructeurs mayas ont puisé leurs matériaux. Ce travail, constituant la seule source scientifique sur les formations superficielles du secteur Río Bec, distingue les dépôts meubles des croûtes calcaires. Les dépôts meubles correspondent à l'appellation *sascab* – issue du maya « terre blanche » : *sak* (blanc) et *kaab* (terre) – généralement employée pour définir une marne calcaire crayeuse et pulvérulente que l'on trouve à l'intérieur des terres au sommet de la pile sédimentaire (Littmann, 1958). Si les dépôts meubles ont été largement utilisés par les constructeurs mayas comme matériaux de terrassement et de nivellement, ainsi que comme liant dans les mortiers et les enduits (Gillot, 2018), c'est bien de la croûte calcaire qu'ils ont extrait les blocs de pierre de taille dont la détérioration nous intéresse dans le présent travail.

Les croûtes calcaires : généralités

Les croûtes calcaires, appelées *caliche* par les hispanophones, *calcrete, hardpan* ou *duricrust* par les anglophones, correspondent à des formations résiduelles constituées aux dépens de la roche mère, couramment observés au sein des profils pédologiques formés sur substrat calcaire (Linoir, 2014). Aussi appelés « encroûtements carbonatés » ou « horizon d'accumulation carbonaté », ces accumulations sont très répandues, couvrant environ 10% des terres émergées (Yaalon, 1988), et se présentent sous différentes formes, à l'état nodulaire, poudreux ou induré et sont principalement mais pas exclusivement composées de carbonate de calcium (Wright et Tucker, 1991). Les croûtes calcaires sont préférentiellement associées aux climats semi-arides (Alonso Zarza, 1999 ; Hamidi *et al.,* 2001 ; Khalaf et Zamel, 2016). On les trouve sous toutes les latitudes et au sein de tous les domaines bioclimatiques, notamment en zone tropicale où elles ont été extensivement étudiées par Goudie (1973).

Les croûtes calcaires : origines et mécanismes de formation

Les mécanismes à l'origine de la formation des croûtes calcaires ont donné lieu à une littérature abondante. Freytet et Verrechia (1989) proposent une synthèse des modèles de formation, cependant difficilement comparables entre eux car associés à des milieux de dépôt (modèles « lacustre » ou « *in situ* »), aux mécanismes de précipitation impliqués (modèles « *per ascensum* » ou « *per descensum* »), ou à l'origine des carbonates (modèles « géochimique », « sédimentaire », ou modèles en lien avec l'activité humaine). Les géologues qui se sont penchés sur les croûtes calcaires du Yucatán (Isphording et Wilson, 1973 ; Héraud-Piña, 1996) ont longtemps favorisé le modèle *per ascensum*, qui explique leur formation par une remontée capillaire associée à l'évaporation des carbonates dissous dans la partie supérieure du substrat lors des périodes sèches. Néanmoins, Freytet et Verrechia (1989) ont remis en question cet ancien modèle, fondé selon eux sur une « méconnaissance de la circulation de l'eau dans les sols » et sur l'hypothèse erronée qu'une croûte calcaire est un « profil simple, unique et actuel ». Certains modèles développés plus récemment (Wright et Tucker, 1991 ; Alonzo Zarza, 1999 ; Alonso Zarza et Wright, 2010), comme le modèle *per descensum,* caractérisé par une accumulation progressive des carbonates provenant du

lessivage des horizons pédologiques sus-jacents, pourraient être applicables aux croûtes calcaires du Yucatán.

Sur ces questions, Gillot (2018) propose, sans écarter définitivement cette hypothèse diagénétique, de considérer celle d'un enrichissement en carbonates induit aussi bien par des processus pédogénétiques que diagénétiques, voire biogéniques. Les systèmes racinaires et les micro-organismes pouvant en effet jouer un rôle important dans la formation des croûtes calcaires, en tant qu'agent de désagrégation mécanique et catalyseur des processus de dissolution et de précipitation.

Les croûtes calcaires : micromorphologie

En raison de leur abondance, dans des contextes géologiques et bioclimatiques variés, et la diversité des mécanismes impliqués dans leur formation, les croûtes calcaires sont susceptibles de comporter un grand nombre de structures macroscopiques et microscopiques. En confrontant les résultats de l'analyse lithostratigraphique et pétrographique des bancs rocheux exploités à Río Bec menée par Gillot (2018) à la synthèse des principales structures micromorphologiques retrouvées dans les croûtes calcaires proposée par Linoir (2014), ainsi qu'à l'étude de l'association de ces structures aux processus biogéniques menée par Zhou et Chafetz (2009), nous ne retiendrons ici que les caractéristiques susceptibles d'être retrouvées dans notre zone d'étude.

L'analyse des bancs rocheux exploités à Río Bec par Gillot (2018) a permis de distinguer deux profils lithostratigraphiques, lesquels se retrouvent dans l'ensemble du site éponyme. Le premier profil correspond aux bancs rocheux exploités dans les zones bien drainées au sommet et sur les flancs des interfluves (profil A), le deuxième (profil B) est assez comparable au niveau inférieur du premier (Fig. II-5).

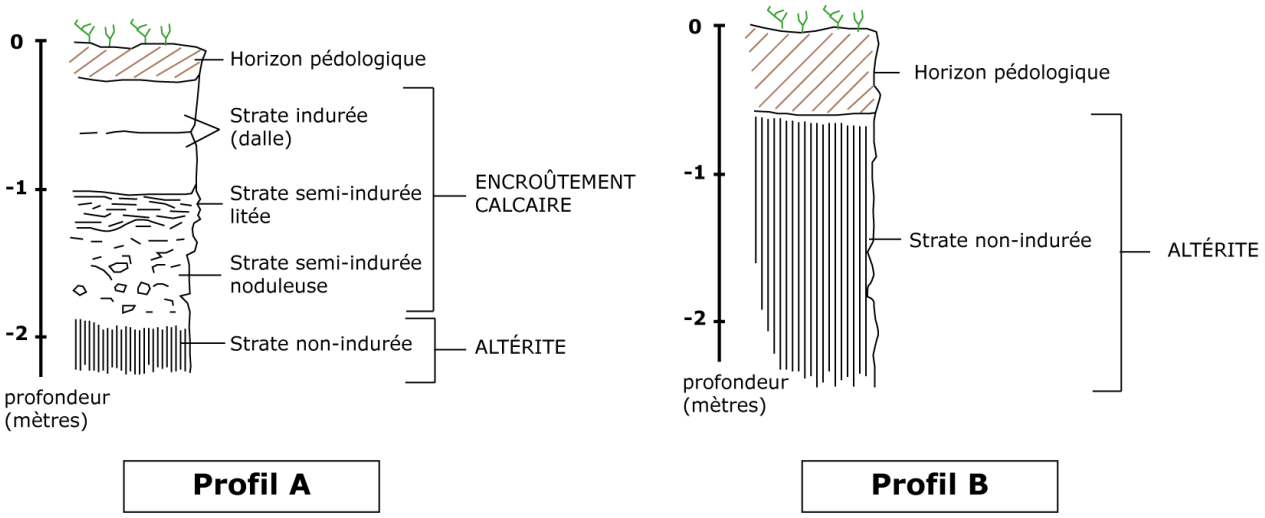


Fig. II-5. Profils stratigraphiques A (à gauche) et B (à droite) identifiés sur les bancs rocheux exploités sur le site éponyme de Río Bec (modifié d'après Gillot, 2018).

Le profil A présente un faciès typique des croûtes calcaires telles qu'elles ont été définies par Wright et Tucker (1991), avec des niveaux différenciés, caractérisés par une induration progressive du bas vers le haut, des calcaires d'aspect crayeux, de couleur crème à blanc cassé voire grisâtre lorsqu'exposés à l'air libre, sans contenu fossilifère. Le profil B est essentiellement composé d'altérites, correspondant aux dépôts meubles desquels les constructeurs mayas pouvaient extraire le *sascab*, qui sont essentiellement des reliquats de la sédimentation marine n'ayant pas été sujets aux processus d'induration dont la signature est observable sur le profil A.

Gillot (2018) interprète la structure du profil A comme très proche de celle qui caractérise les croûtes calcaires de la formation Icaiche, dans lesquelles les plages de sparite témoignent d'une genèse récente par des phénomènes de recristallisation et de dolomitisation. Le profil A est également caractérisé par la présence de rhizolithes (pores ou tubes cylindriques qui proviennent d'une cimentation de calcite autour des racines) et de péloïdes (terme générique utilisé par Gillot pour qualifier des agrégats arrondis à composition et structure hétérogène). L'abondante présence de nano-aiguilles de calcite qui comblent la porosité dans les échantillons observés en lames minces indique une recristallisation secondaire rapide après d'intenses phases d'évaporation et une biominéralisation par les systèmes racinaires et les micro-organismes. Enfin, des concrétions argileuses appartenant à la famille des phyllosilicates ont été identifiées dans les parties correspondant à la dalle indurée et aux altérites (Fig. II-6). D'une manière

générale, la porosité tend à augmenter avec la profondeur à laquelle les échantillons ont été prélevés, de même que la présence de grains de sparite isolés. Le nombre et le niveau de développement des nano-aiguilles de calcite, en revanche, tend à diminuer avec la profondeur. Le profil B est quant à lui caractérisé par un unique niveau d'altération correspondant à la dissolution et à la karstification du substrat rocheux local.

Les caractéristiques détaillées précédemment sont largement en mesure d'attester la nature résiduelle et secondaire des croûtes calcaires qui constituent les bancs rocheux exploités à Río Bec. On retrouve dans la synthèse des structures macroscopiques effectuée par Linoir (2014) la majorité de ces caractéristiques : imbrication laminaire de textures micritiques avec des plages de sparite, grains de sparite isolés, rhizolithes et péloïdes, ainsi que nids de nano-aiguilles de calcite (Fig. II-7).

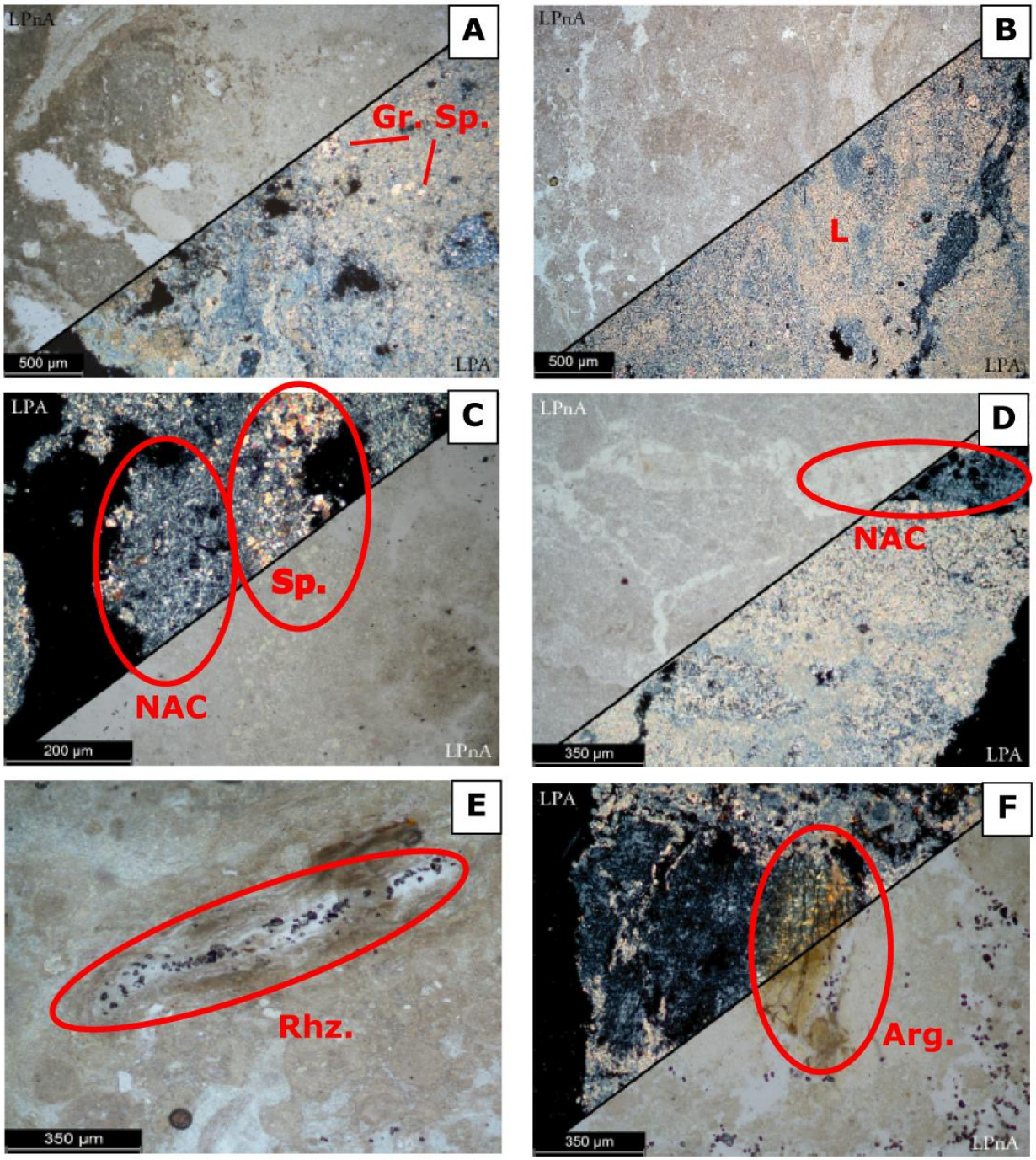


Fig. II-6. Observations en lames minces des échantillons prélevés dans le profil lithostratigraphique A des bancs rocheux exploités à Río Bec (modifié d'après Gillot, 2018). A : vue d'ensemble de la structure et grains de sparite isolés (Gr. Sp.) ; B : vue d'ensemble de la structure laminaire imbriquant plages de micrite et de sparite (L) ; C : plages de sparite (Sp.) et recristallisation secondaire par les nano-aiguilles de calcite (NAC) ; D : nano-aiguilles de calcite comblant la porosité (NAC) ; E : rhizolithes (Rhz) ; F : concrétions argileuses (Arg.)

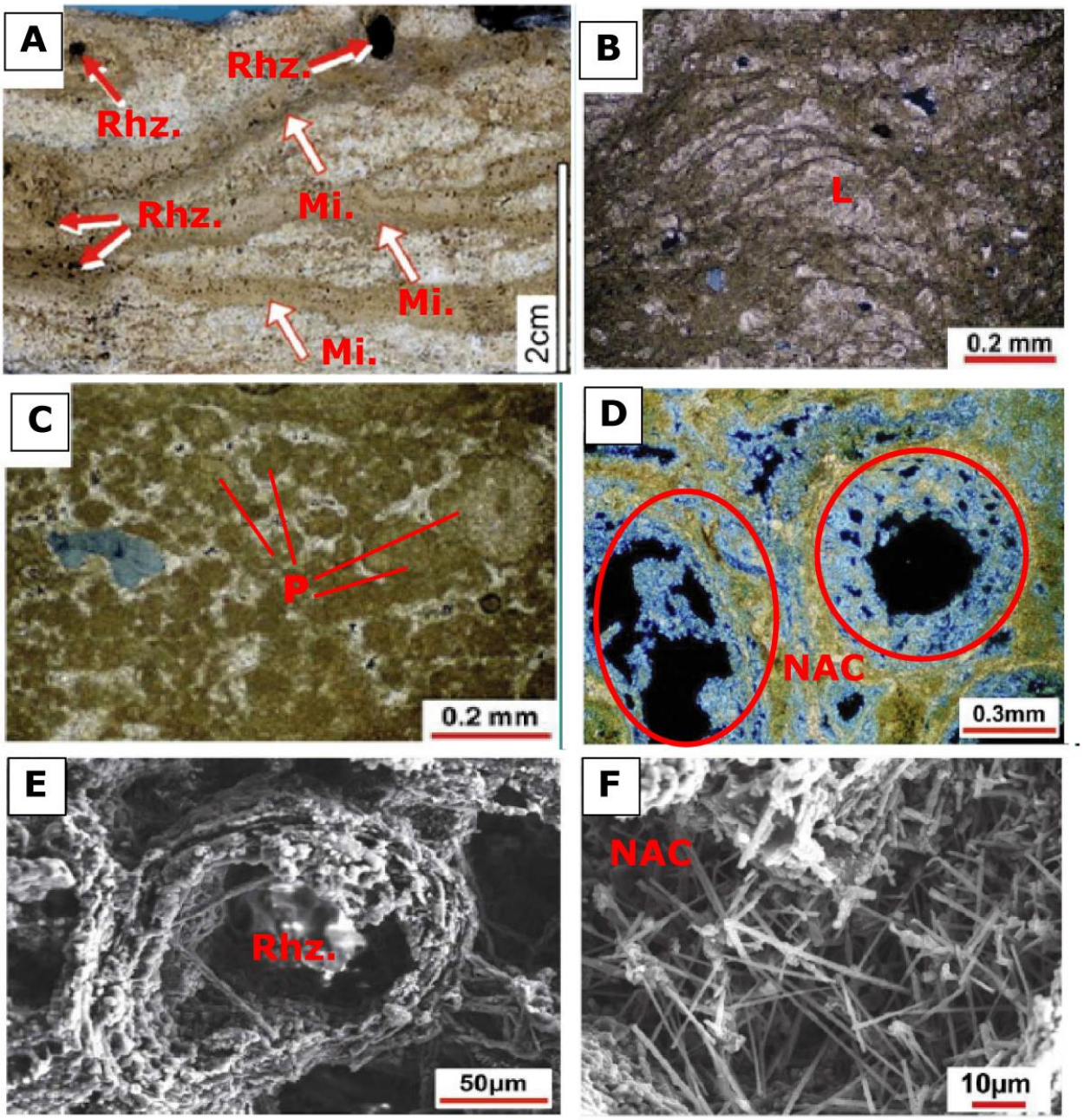


Fig. II-7. Observations en lames minces (A, B, C, D) et au microscope électronique à balayage (E, F) des principales structures retrouvées dans les croûtes calcaires (modifié d'après Linoir, 2014, et Zhou et Chafetz, 2009). A : imbrication des textures micritiques (Mi.), et différentes formes de rhizolithes (Rhz.) ; B : structure laminaire (L) ; C : péloïdes (P) ; D : recristallisation secondaire par les nano-aiguilles de calcite (NAC) ; E : rhizolithe circulaire observé au MEB (Rhz.) ; F : nids de nano-aiguilles de calcite (NAC) observés au MEB.

Dans leur étude des croûtes calcaires au Texas, Zhou et Chafetz (2009) proposent une association des caractéristiques macro et microscopiques de ces formations à des phénomènes de biogenèse par les micro-organismes (Fig. II-8). En fonction des principales caractéristiques observées par Gillot (2018), on peut ainsi attester l'origine biogénique des croûtes calcaires de Río Bec, impliquant notamment le système racinaire de la végétation, les champignons et bactéries comme principaux agents.

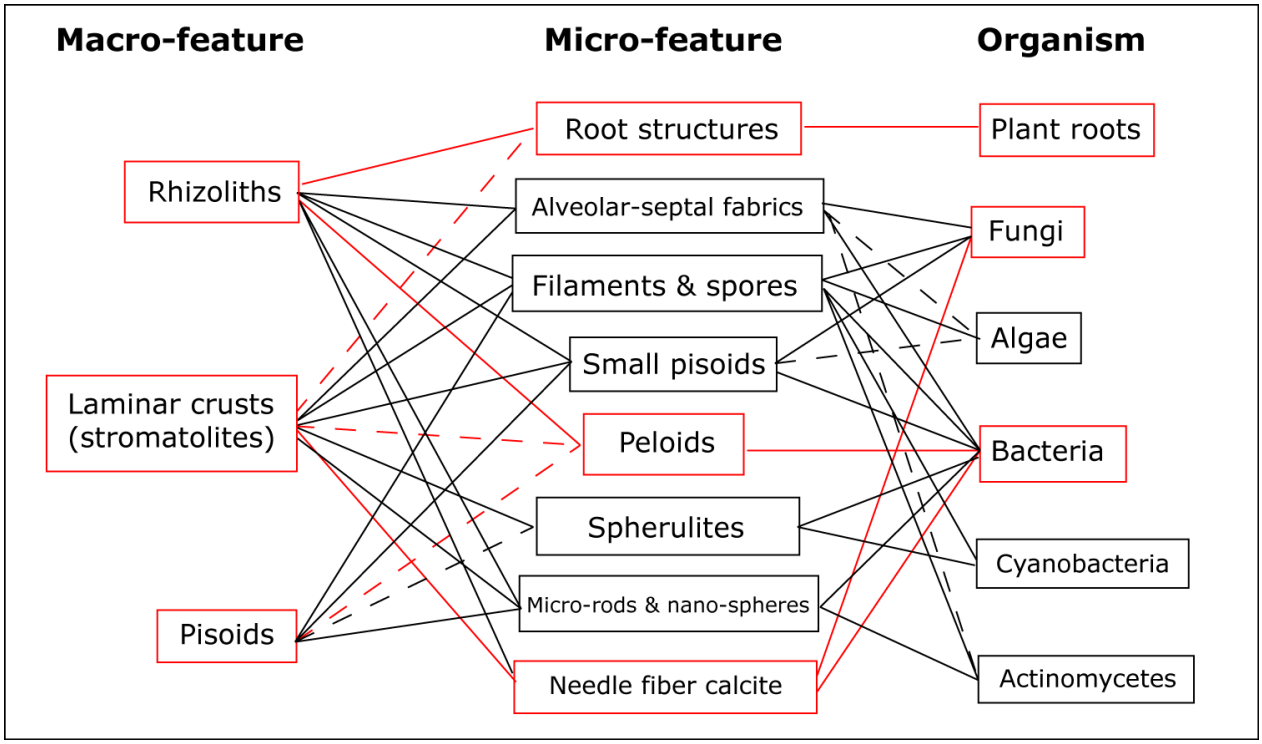


Fig. II-8. Association des caractéristiques micro et macroscopiques des croûtes calcaires aux micro-organismes intervenant dans la biogenèse (modifié d'après Zhou et Chafetz, 2009). En rouge les caractéristiques observables, les lignes continues correspondent à des associations courantes, celles en pointillés à des associations occasionnelles.

Les bancs rocheux exploités à Río Bec sont donc des formations résiduelles correspondant à des encroûtements carbonatés dont la genèse implique à la fois des processus diagénétiques et pédogénétiques (modèles de formation « *per ascensum* » et « *per descensum* ») ainsi que des phénomènes de biominéralisation par le système racinaire, les champignons et bactéries. Il faut retenir, à la suite de Gillot (2018) que si les calcaires utilisés comme matériaux de construction paraissent visuellement purs et homogènes, il ne s'agit en aucun cas d'une roche au sens strict du terme, mais d'une formation résiduelle et secondaire s'étant constituée aux dépens du substrat. Les matériaux qui en ont été extraits

sont donc susceptibles de comporter un grand nombre de faiblesses, telles que des discontinuités des structures induites par la diversité des processus impliqués, un manque de cohésion dû à un faible degré de diagenèse et une hétérogénéité générale de la dalle calcaire.

1.1.3. Relief, sol, et réseau hydrographique

A l'échelle régionale, le Yucatán n'offre que très peu de relief, particulièrement dans sa partie nord qui est presque une plaine nivelée. Au sud de la partie mexicaine de la péninsule, quelques élévations ne dépassent guère 250 mètres d'altitude. Les zones de dissolution préférentielle se localisent principalement le long des failles et fractures et induisent une pénétration immédiate des précipitations en subsurface. Ainsi, il n'existe pas de rivières ni de fleuves au nord, alors qu'un réseau hydrographique de surface draine le centre et le sud de la péninsule (López Ramos, 1973). Le paysage est en revanche parsemé de modelés karstiques, dont les dolines (*bajos* ou *aguadas)*, les alignements de collines et les cénotes – puits d'effondrement partiellement ou totalement noyés offrant un regard sur la nappe phréatique (Héraud-Piña, 1996) – sont les exemples les plus représentatifs, mais n'existent véritablement que dans le nord de la péninsule.

Le secteur Río Bec est situé à l'extrémité est de la *meseta* de Zoh Laguna, parfois appelée « *Serranía de Xpujil* », une structure anticlinale orientée nord-sud, culminant à 400 mètres au-dessus du niveau de la mer, et dont la partie orientale est entrecoupée par diverses vallées plus ou moins encaissées (Gillot, 2018). Le relief du secteur est donc composé de zones planes correspondant aux interfluves, séparées par des talwegs constituant les principaux axes de drainage (Lemonnier et Vannière, 2013). A l'inverse du reste de la péninsule, le secteur Río Bec est caractérisé par un réseau hydrographique de surface, actif sous la forme de torrents et petites rivières qui s'écoulent dans le fond des talwegs à la saison des pluies, ou forment des *bajos* (marais) saisonniers dans les zones basses plus étendues qui séparent les interfluves.

Au sein des environnements géomorphologiques identifiés par Bautista Zuñiga *et al.* (2011), le secteur Río Bec se situe dans une zone de karst relativement ancien (5,3 millions d'années) dans laquelle on retrouve une association de vertisols, leptosols, et gleysols. Ces

types de sols, généralement peu profonds, insuffisamment drainés et aérés sont cultivables bien que peu propices à l'agriculture, et communs dans les Basses Terres Centrales.

1.2. Contexte bioclimatique

Largement susceptible de commander l'agressivité des paramètres environnementaux auxquels les sites archéologiques ont été soumis, le contexte bioclimatique tient un rôle important dans l'approche développée. En effet, climat, végétation et micro-organismes jouent un rôle dans la détérioration des monuments en tant que facteurs extrinsèques de la dégradation de la roche. Il convient donc de définir ce contexte bioclimatique, de l'échelle régionale de la péninsule à l'échelle locale du secteur étudié.

1.2.1. Climat

La partie mexicaine de la péninsule du Yucatán est située dans la zone intertropicale, entre 18 et 22° N. On y trouve un gradient climatique nord-sud du plus sec au plus humide. La côte nord est la plus sèche avec des nuances climatiques de type BSh selon la classification de Köppen-Geiger, soit un climat de steppe sec et chaud avec une température moyenne annuelle supérieure à 18°C, une évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles, une courte saison sèche en été et des précipitations du mois estival le plus sec inférieures à 40mm et au tiers du mois hivernal le plus humide (Hufty, 2001). Dans le reste de la péninsule se déclinent les sous-types du climat de type Aw selon la classification de Köppen-Geiger, soit des variations du climat tropical subhumide, avec une température moyenne annuelle supérieure à 18°C, une absence d'hiver thermique remplacé par une saison sèche en hiver, des précipitations annuelles supérieures à l'évaporation annuelle et inférieures, lors du mois le plus sec, à 60 mm et à [100 – (précipitations annuelles moyennes)/25] (Hufty, 2001). Les isohyètes montrent également que la côte ouest est moins arrosée que la côte est, davantage exposée aux vents dominants venant de la mer des Caraïbes (Fig. II-9).

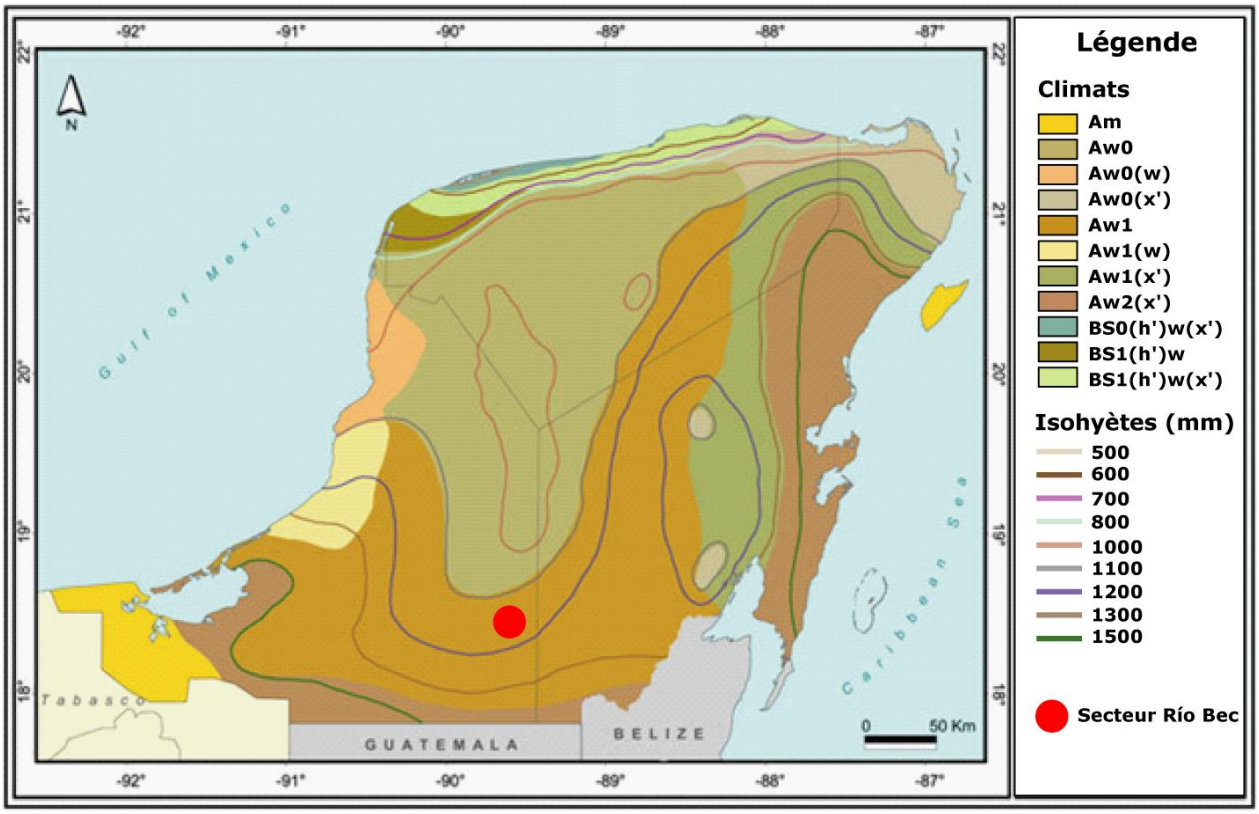


Fig. II-9. Distribution des types de climats et des précipitations dans la partie mexicaine de la péninsule du Yucatán (modifié d'après Torrescano-Valle et Folan, 2015).

Le secteur Río Bec se trouve dans la zone climatique Aw1, qui correspond à un climat tropical de savane. Selon les auteurs qui ont travaillé sur le secteur, le climat qui y règne est défini comme « tropical humide », avec une température moyenne annuelle supérieure à 25°C, des précipitations annuelles qui varient entre 1000 et 2000 mm (Vivo Escoto, 1964) ; « tropical chaud subhumide » (Aw2), avec une saison des pluies de mars à octobre, des températures moyennes entre 21 et 28°C et des précipitations moyennes annuelles de 1260 mm/an (Sprajc, 1995) ; ou encore « tropical semi-humide » avec une température moyenne annuelle de 26-27°C, et 1300 mm de précipitations annuelles (Straulino, 2013).

Le diagramme ombrothermique de la ville de Xpujil (Fig. II-10), située au cœur du secteur étudié, disponible sur le site climate-data.org compilant les données climatiques de 1982 à 2012, nous offre un regard plus quantitatif sur les paramètres climatiques de la zone d'étude. Le climat qui y règne est bien qualifié de climat tropical de savane (Aw), et les données permettent d'en valider les caractéristiques proposées par Hufty (2001) : températures moyennes supérieures à 18°C toute l'année, absence d'hiver thermique

remplacé par une saison sèche en hiver, précipitations du mois le plus sec inférieures à 60 mm et à [100 – (1140)/25].

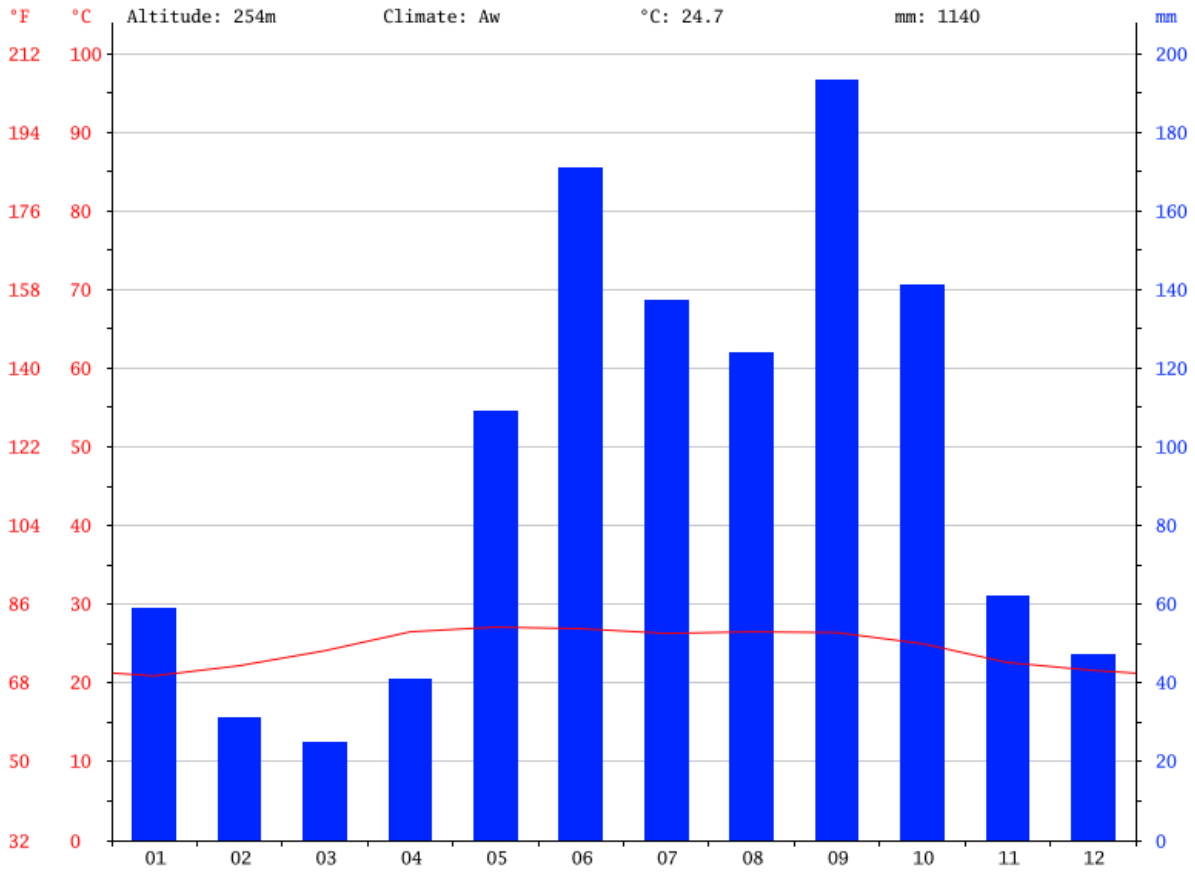


Fig. II-10. Diagramme ombrothermique de la ville de Xpujil, localisée au cœur du secteur Río Bec (source : climate-data.org, consulté le 21/11/2018).

Avec des saisons contrastées, une saison des pluies de mai à octobre et une saison sèche de février à mars, des températures annuelles moyennes d'environ 25°C et des précipitations annuelles moyennes de 1140 mm, le secteur Río Bec est donc bien caractérisé par un climat tropical de savane (Aw). Par ailleurs, les études paléoenvironnementales menées sur la péninsule du Yucatán et synthétisées par Torrescano Valle et Folan (2015) confirment que les conditions climatiques de la région n'ont que très peu varié depuis le début de l'Holocène. Le seul climat dans lequel les sites archéologiques ont donc évolué, que ce soit depuis leur construction originelle ou depuis leur redécouverte, est le climat tropical de savane, bien que l'on ne retrouve pas la formation végétale éponyme dans le secteur.

1.2.2. Végétation

On trouve dans les zones basses et côtières de la péninsule les formations végétales associées au climat de steppe (BS) : *petenes* (forêts tropicales recouvrant des collines résiduelles), mangroves, dunes littorales broussailleuses, prairies à laîches et marais à massettes, alors que sur le reste de la péninsule domine une déclinaison de forêt tropicale, à feuillage décidu ou persistant (Bautista Zuñiga *et al.,* 2011). Le secteur Río Bec est situé dans une zone de forêt tropicale « perturbée » par les activités anthropiques (Fig. II-11), notamment dans le site éponyme où un grand nombre d'habitants de l'*ejido del veinte de noviembre* – premier établissement humain à proximité du site – travaillent et vivent de la foresterie.

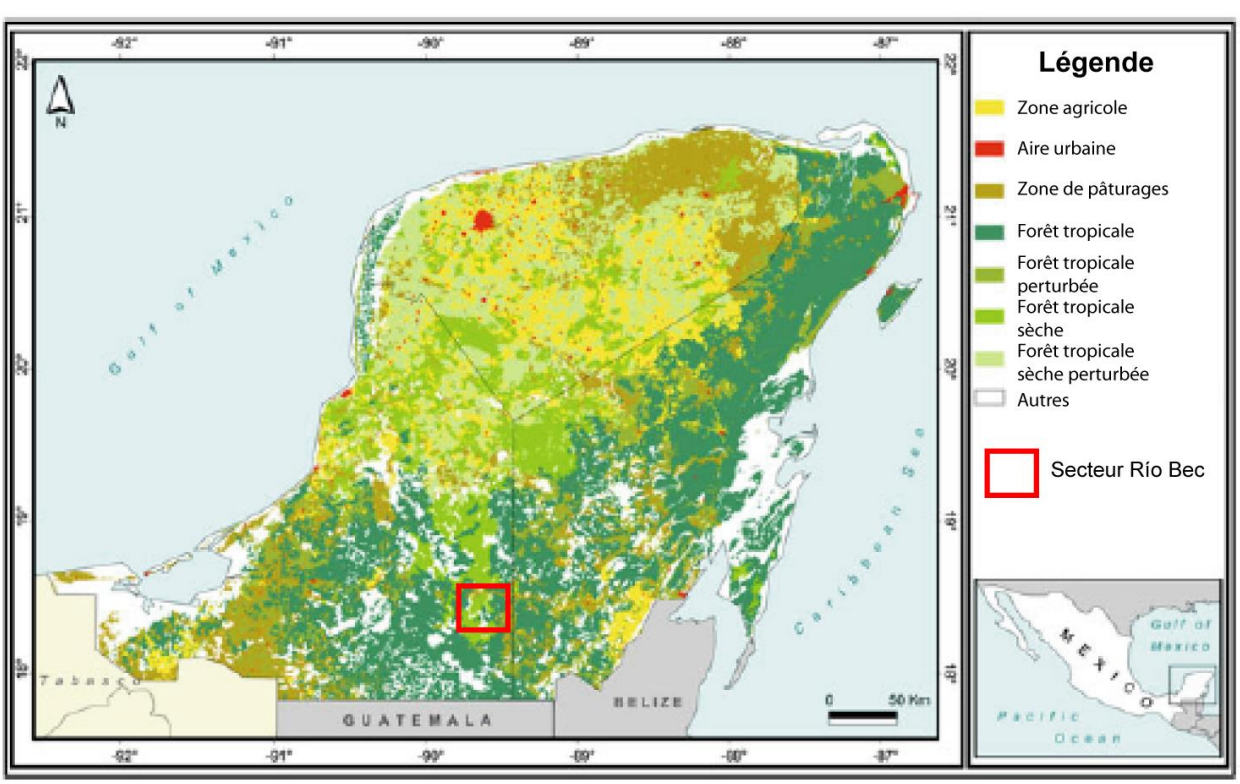


Fig. II-11. Carte simplifiée de distribution de la végétation dans la péninsule du Yucatán (modifié et traduit d'après Islebe *et al.,* 2015).

En effet, les travaux d'archéobotanique menés sur le site éponyme de Río Bec par Dussol *et al.* (2016) insistent sur le caractère « dégradé » de la forêt tropicale actuelle dans la région de Calakmul, malgré le classement récent de la zone en tant que réserve naturelle protégée. Il s'agit, selon ces auteurs, d'une forêt humide sub-persistante haute à moyenne

(*selva alta y mediana subperennifolia húmeda)*, similaire à celle qui recouvre une grande partie du Mexique tropical. On y dénombre pas moins de 134 espèces différentes d'arbres et arbustes, appartenant à 40 familles botaniques (Martinez et Galindo Real, 2002). Selon Dussol *et al.* (2016), les communautés végétales les plus communes dans la région sont les forêts de *chicle* (*zapotal*) et les forêts de noix-pain *(ramonal)*, dont les arbres atteignent 15 à 25 mètres de hauteur (tab. II-1).

Nom scientifique	Nom vernaculaire local	Equivalent français
Forêt de *chicle (ou zapotal)*		
Manilkara zapota	*chicozapote*	sapotillier
Pouteria amygdalina	*sapote*	
Pouteria campechiana	*k'anisté*	canistel
Pouteria reticulata	*sapotillo*	
Pouteria sapota	*sapote mamey*	
Brosimum alicastrum	*ramón*	noix-pain
Swietenia marophylla	*caoba*	bois-de-chien
Vitex gaumeri	*ya'ax niik*	
Forêt de noix-pain (ou *ramonal)*		
Brosimum alicastrum	*ramón*	noix-pain
Manilkara zapota	*chicozapote*	sapotillier
Pouteria reticulata	*sapotillo*	
Pimenta dioica	*pimienta*	piment de la Jamaïque
Talisia olivaeformis	*guaya*	
Licaria campechiana	*aguatillo*	

Tab. II-1. Principales essences retrouvées dans les communautés végétales les plus communes du secteur Río Bec (d'après Dussol *et al.*, 2016).

D'autres communautés sont présentes mais moins communes, telles que la forêt de *pukte*, dominée par l'essence du même nom *Bucida burseras*, la forêt de *bayo* dominée par *Aspidosperma cruentum* (*bayo rojo)* et *Aspidosperma megalocarpon* (*bayo blanco)*, et la forêt de *machiche,* dominée par *Lonchocarpus castilloi* (*machiche*) et *Piscidia piscipula* (*habín*). Dans les *bajos* (nom régional donné aux dépressions karstiques semblables à des dolines), on trouve des broussailles épineuses associées à des arbustes de 4 à 8 mètres de hauteur, dont les espèces dominantes sont : *Ateleia gummifera, Bravaisia berlandieriana (julubal), Bucida buceras, Byrsonima bucidaefolia (nance), Cameraria latifolia (chechen blanco), Coccoloba cozumelensis (boochi che'), Cordia dodecandra (ziricote), Croton icche (p'ere'es k'uuch), Diospyros bumelioides (siliil), Eugenia spp., Gliricidia maculata (cocoite), Haematoxylon campechianum (palo tinto), Hyperbaena winzerlingii (tripa de cochino),*

Lonchocarpus xuul (xu'ul), Manilkara zapota, Metopium brownei (chechen negro), Thevetia gaumeri (campanilla), et *Talisia floresii (kolok)* (Martínez et Galindo-Leal, 2002). Ces espèces végétales, combinées aux plantes basses, grimpantes, et autres épiphytes associés forment un couvert forestier dense (Fig. II-12), sous lequel les structures archéologiques sont enfouies et parfois difficilement discernables.

Fig. II-12. Aperçu de la végétation à proximité du site éponyme Río Bec.

1.2.3. Micro-organismes

Les conditions bioclimatiques tropicales qui règnent dans la péninsule du Yucatán permettent la croissance et la subsistance d'une large gamme de microorganismes, dont les potentiels effets ont été appréciés dans le premier chapitre du présent manuscrit. Au-delà de ce qui a été dit précédemment, il s'agit ici de faire un premier inventaire des micro-organismes susceptibles d'être présents dans le secteur étudié afin de cibler plus efficacement des éléments d'interprétation quant à leur rôle dans la détérioration des structures archéologiques.

Dans leur étude comparative de la biomasse microbienne entre Europe et Amérique latine, Gaylarde et Gaylarde (2005) ont mis en évidence la très grande représentation des cyanobactéries et des champignons dans les biofilms étudiés sur les différents matériaux constitutifs des monuments latino-américains. Cette abondance est confirmée par les différentes études menées sur les structures archéologiques mayas. McNamara *et al.* (2006) ont identifié des communautés endolithiques d'actinobactéries et d'acidobactéries, ainsi que des communautés épilithiques de protéobactéries sur le site d'Ek'Balam. Les mises en culture en laboratoire d'échantillons prélevés à Uxmal, dans la région Puuc, et à Tulum, sur la côte caribéenne, par Videla *et al.* (2003) ont montré que les cyanobactéries de type *Xenococcus* et *Gloeocapsa* ainsi que des algues filamenteuses constituaient la majeure biomasse des biofilms complexes recouvrant les structures archéologiques. Cette prédominance des cyanobactéries se retrouve dans les travaux d'Ortega Morales *et al.* (2005, 2006) qui les identifie comme principal organisme colonisateur sur les sites d'Uxmal, Palenque et Edzna, en insistant sur la diversité des communautés, dominées par des cyanobactéries cocciformes (*i.e.* de forme sphérique). Il en va de même sur les sites mayas du Belize (Opalade, 2016), et sur les masques sculptés en stuc de Tikal au Guatemala (Ortega Morales *et al.* 2013b). Par ailleurs, De la Rosa García *et al.* (2011) ont pu isoler les champignons de types *Aspergillus, Penicillium, Fusarium, et Paecilomyces* qui colonisent les édifices d'Uxmal. Plus récemment, Ortega Morales *et al.* (2016) ont identifié des organismes proches des taxons précédents à Chichén Itzá, où Gonzales Gomes *et al.* (2018) ont identifié les algues, lichens et bactéries qui constituent des biofilms de différentes couleurs. Enfin, Ortega Morales *et al.* (2013a) ont également travaillé sur les effets de l'orientation des structures de Becán sur leur colonisation par l'algue *Trentepohlia*, indiquant également la présence de cyanobactéries de type *Gloeocapsa* et de lichens blancs non identifiés.

Au total, les micro-organismes colonisateurs sont largement susceptibles de se retrouver en très grand nombre sur les structures archéologiques des sites étudiés. Parmi les principaux, nous retiendrons la grande représentation des communautés de cyanobactéries, se présentant sous la forme de biofilms noirs (Fig. II-13b), de l'algue *Trentepohlia* identifiée à Becán, se présentant sous la forme d'un biofilm rosâtre à orange (Fig. II-13a), sans oublier la présence possible de différents lichens, champignons, et mousses.

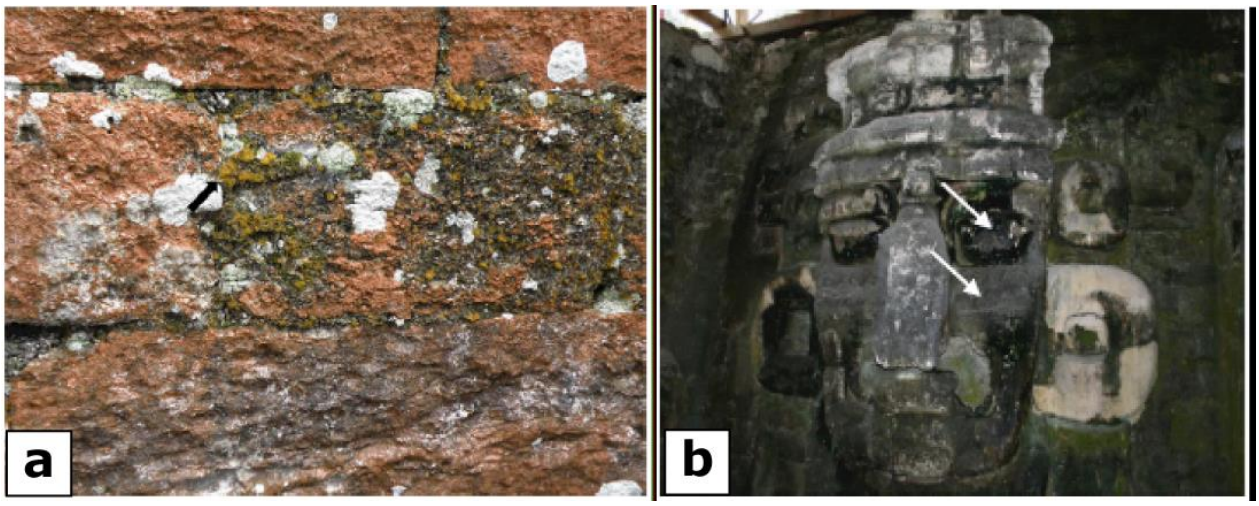


Fig. II-13. Aperçu des principaux organismes colonisateurs susceptibles d'être représentés dans le secteur étudié : algue *Trentepohlia* (a) sous la forme d'une patine rosâtre ou filamenteuse orangée, Ortega-Morales *et al.* (2013a) ; communautés de cyanobactéries (b) sous la forme d'un biofilm grisâtre à noir (flèches blanches), Ortega-Morales *et al.* (2013b).

La croissance et la subsistance de ces principaux micro-organismes ont des implications potentiellement importantes en termes de détérioration mécanique ou chimique de l'épiderme rocheux, mais également de dommages esthétiques. L'identification de ces agents et l'estimation de leur impact, tant négatif que positif, constituent un objectif majeur du volet de caractérisation des facteurs extrinsèques de la détérioration du patrimoine exceptionnel que constituent les sites archéologiques du secteur Río Bec.

2. Le secteur Río Bec : une exception archéologique

Les Basses Terres Centrales de la péninsule du Yucatán sont l'écrin d'un secteur archéologique dont le choix a été motivé par sa valeur patrimoniale, largement due à son originalité au sein de la sphère culturelle de la civilisation maya. Moins connu que les sites de la région Puuc ou que les cités majeures de Tikal ou Chichen Itzà, le secteur Río Bec se démarque par un style architectonique très individualisé qui émerge à la période classique, mais aussi par une implantation singulière des édifices qui est la traduction d'une organisation socio-politique particulière. Alors que la plupart des sites archéologiques des Basses Terres se caractérisent par un centre de nucléation très densément peuplé et une périphérie résidentielle, le secteur Río Bec présente des unités résidentielles clairsemées sur de vastes surfaces (Nondédéo *et al.,* 2010).

Il s'agit ici de présenter le contexte archéologique du secteur et d'insister sur les aspects singuliers qui en font une exception au sein de l'aire culturelle maya et justifient l'intérêt porté à la détérioration de ses structures à forte valeur patrimoniale. Dans un premier temps, nous construirons les principaux repères chronologiques qui permettront d'avoir un aperçu de la trajectoire d'occupation et de construction des sites archéologiques. Dans un second temps, nous nous attacherons à définir le style architectonique Río Bec et ses principaux aspects, ainsi qu'à souligner leur potentiel pour l'application des méthodes retenues dans ce travail. Enfin, dans un dernier temps, nous nous intéresserons de plus près à cette organisation socio-politique particulière, qui fait de ce secteur une exception archéologique.

2.1. Repères chronologiques et différentes phases d'occupation

La chronologie du secteur Río Bec est aujourd'hui relativement bien connue, grâce à l'intérêt que lui ont porté les architectes et les archéologues à partir des années 1970, et l'ouverture de la route entre Chetumal et Escarcega. Une première séquence de référence pour le secteur a été établie par Ball en 1973 à partir du matériel céramique retrouvé sur le site de Becán et a été depuis affinée (Ball, 1973 et 2014). En effet, les campagnes de fouilles et de restauration entreprises à Becán et Xpuhil dans les années 1980 et le projet Río Bec (2002-2010) centré sur le site éponyme ont permis l'acquisition d'informations et de matériel nécessaire à une reconstitution plus fine du cadre chronologique du secteur, qui a été précisé au gré de ces travaux (Bueno Cano, 1999 ; Campaña Valenzuela, 2004 ; Dzul et Taladoire, 2010 ; Nondédéo et Dzul, 2010 ; Taladoire *et al.,* 2013), et Gillot (2018) a défini six phases chronologiques distinctes pour l'ensemble du secteur.

Afin de ne retenir que les informations essentielles au cadre chronologique dans lequel s'est épanoui le style Río Bec sans se noyer dans la complexité de la construction des séquences céramiques, nous ne retiendrons ici que trois grandes phases. Ces dernières ne doivent en aucun cas être considérées comme complètement distinctes les unes des autres ou séparées par des ruptures nettes, le style Río Bec ne s'étant pas développé *ex nihilo* mais selon un processus d'intégration continue des innovations architecturales et

iconographiques en lien avec les secteurs voisins, et parfois même les plus éloignés (Taladoire *et al.,* 2013). Au total, ces trois phases permettent une approche simplifiée d'une trajectoire complexe dont la connaissance est nourrie par une somme importante de travaux.

Phase 1 : des débuts de l'occupation à la stabilisation (600 av. J.-C.-550 apr. J.-C.)

Les premières traces d'occupation humaine dans le secteur Río Bec remontent aux alentours de 600 av. J.-C., à la période du Préclassique moyen, au cours de laquelle s'observe un peuplement progressif de la région, surtout concentré sur le site de Becán. Si les populations de l'époque pratiquent la culture sur brûlis et sont en contact avec la région du Petén au sud, il n'y a aucune trace de vestiges monumentaux de cette période, ce qui laisse supposer que les habitations étaient construites de matériaux périssables. A partir de 300 av. J.-C., le peuplement s'intensifie et les premières constructions en pierre apparaissent, notamment à Becán où sont construits le fossé défensif qui entoure la ville et les premiers soubassements pyramidaux autour d'un centre monumental. Jusqu'au VIe siècle apr. J.-C., la région est marquée par une période de continuité et de stabilisation, avec de nombreux échanges inter-régionaux (des régions voisines jusqu'au Mexique central). La population augmente et l'habitat se densifie dans les espaces situés entre les centres monumentaux.

Phase 2 : Émergence et apogée du style Río Bec (550-900 apr. J.-C.)

Au cours de la période classique, la région est sujette à d'importantes transformations dans la structure de l'habitat et les modes de production agricole, qui aboutissent à un début d'individualisation de la région au sein de la sphère maya classique. Les centres urbains à places publiques et constructions monumentales ne sont plus développés. En revanche, les unités résidentielles dispersées entre ces centres urbains se multiplient et se complexifient, les édifices sont maintenant composés d'un nombre élevé de pièces et arborent en façade des décors sculptés : le style Río Bec émerge. La céramique locale acquiert une identité propre et s'affranchit des influences extérieures. A partir de 700 apr. J.-C., c'est l'apogée du style Río Bec. L'habitat se contracte autour des unités résidentielles dispersées qui sont maintenant de grandes résidences bardées de tours et de

faux temples. Ces unités socio-économiques sont contrôlées par une noblesse paysanne qui se réapproprie les terres divisées et forme des domaines agricoles attractifs et compétitifs, tout en rivalisant de splendeur par la décoration de leurs résidences.

Phase 3 : Déprise et abandon (900-1100 apr. J.-C.)

A partir du Xe siècle, la région entre progressivement dans une période de déprise et d'abandon. La construction cesse dans l'ensemble des sites, et la région se vide peu à peu de ses habitants qui se déplacent vers les centres urbains dynamiques du Postclassique récent et du Postclassique (Chichén Itzà puis Mayapan). Les grandes maisons de Río Bec sont abandonnées vers 950, seul Becán continue de concentrer quelques habitants et survit à la déprise jusqu'en 1100. Quelques traces d'occupation subsistent jusqu'en 1200, mais elles indiquent le plus souvent des établissements temporaires, sûrement fréquentés par des populations nomades revenues à la culture itinérante sur brûlis.

Le style Río Bec a donc émergé assez tardivement et son extension dans le temps ne couvre réellement que quatre siècles. Durant cette période, une organisation sociopolitique très particulière s'est mise en place dans ce secteur, dont le style Río Bec est la traduction architecturale.

2.2. Une organisation socio-politique particulière au sein de l'aire culturelle maya

Dans une large mesure, les cités mayas de la période classique s'organisaient autour d'un centre nucléé, où l'on retrouvait des structures monumentales concentrant les fonctions politiques, religieuses, et symboliques. A l'inverse, dans le secteur Río Bec – particulièrement dans le site éponyme, et à l'exception de Becán – ce processus d'agglomération, commun à la plupart des secteurs archéologiques qui lui sont contemporains, ne s'est pas produit. Les vestiges du site éponyme, pour beaucoup représentatifs du secteur archéologique, témoignent d'une configuration très dispersée de groupes monumentaux dans un environnement rural, modérément favorable à l'exploitation agricole intensive de petits domaines, occupés sur une longue durée, mais avec une brève

apogée de trois siècles avant abandon définitif (Michelet *et al.,* 2008b). Cette organisation « atomisée » s'articule autour de nombreuses unités locales de pouvoir, à fonction résidentielle et domestique, à la fois autonomes et hiérarchisées, régulièrement espacées, autour desquelles se développe le système agricole (Arnauld *et al.,* 2014).

Le système agricole développé à Río Bec a permis de maintenir des unités autonomes, fondées sur une agriculture intensive *infield* (*i.e.* à proximité immédiate du lieu d'habitation), sans jachère ni brûlis, ayant pour cadre social le groupe familial en résidence, avec une forte autonomie socio-économique (Arnauld *et al.,* 2014). Si la stabilité des habitats, due à la longue trajectoire d'occupation du secteur, explique le maintien des dimensions des surfaces cultivées, Lemonnier et Vannière (2013) observent une corrélation entre ces dernières et le prestige de l'unité à laquelle elles sont associées, prestige traduit dans la monumentalité de l'architecture. Cela laisse penser que les grandes unités intensifiaient leur production et menaçaient les petites unités voisines, donc que les domaines agricoles étaient en compétition. De même, selon les mêmes auteurs, le degré de diversité fonctionnelle et de complexité des structures au sein d'une même unité suggère une imbrication des dynamiques d'intensification de la production agricole et d'élaboration architecturale.

La hiérarchie des unités de pouvoir dans le secteur Río Bec est fondée sur le prestige, toujours traduit dans l'architecture, mais également structurée par un système d'alliances matrimoniales. Se marier signifiait obtenir une nouvelle résidence et une nouvelle surface de production agricole, la pratique habituelle dans l'aire culturelle maya étant celle de l'exploitation agricole par la famille étendue, sans recours au travail salarié ou à l'esclavage, ni différenciation entre la propriété et l'usufruit, donc sans location ou rente (Arnauld *et al.,* 2014). En étudiant les éléments architecturaux relatifs au prestige de chaque unité, Arnauld *et al.* (2013) ont montré que les unités associées aux structures archéologiques 6N1 et 5N2 étaient les plus prestigieuses du site éponyme, arborant salles de réunion et de réception, mais aussi que le prestige des unités – et donc des groupes sociaux qui la composent – était assuré et maintenu par des alliances renouvelées régulièrement. C'est donc une véritable noblesse paysanne qui a émergé de ce système d'alliances fondé sur le prestige des familles vivant dans les unités de pouvoir. Les membres de cette noblesse se sont mariés dans tous les groupes sociaux afin d'obtenir de plus en plus de terres, de plus en

plus de récoltes, augmentant ainsi son prestige, lui permettant par la suite d'absorber d'autres unités qui seront rattachées à l'unité de base, laquelle élabore de plus en plus son architecture monumentale. L'apogée du style Río Bec coïncide alors avec la prospérité de cette noblesse paysanne, composée de petits groupes de producteurs agricoles sous l'égide d'une unité centrale de pouvoir, et explique la vaste étendue des sites archéologiques du secteur, sans nucléation autour d'un centre monumental rayonnant sur une agglomération.

Cette organisation politique singulière dans le monde maya classique s'est développée dans une conjoncture climatique favorable jusqu'au IXe siècle, favorisant les récoltes abondantes et le gain de pouvoir associé. De surcroît, le secteur Río Bec profite également d'un isolement politique et économique : la région est isolée des principaux réseaux d'échanges des Basses Terres, comme en témoigne la rareté des traces d'obsidienne et la pauvreté du mobilier funéraire (Arnauld *et al.,* 2014). Elle est également éloignée des lignes d'affrontement entre les grandes puissances régionales, Calakmul et Tikal, qui la considèrent vraisemblablement comme une région marginale sans grand intérêt stratégique (Nondédéo *et al.,* 2010). En effet, selon les mêmes auteurs, le secteur Río Bec s'est développé en parallèle du règne de la dynastie Kaan à Calakmul, mais indépendamment. Cette organisation politique a en effet connu un développement linéaire, sans rupture brutale, la relative autonomie de chaque unité de pouvoir n'ayant pas semblé constituer une menace pour Calakmul, ni l'avoir incitée à étendre son contrôle sur ces territoires. La période d'apogée et de diffusion du style Río Bec dans le centre de la péninsule aux IXe et Xe siècle coïncide en fait avec une période d'affaiblissement des rois gouvernant la région, les éléments architecturaux typiques s'étant largement diffusés dans les complexes résidentiels de la noblesse régionale ambitieuse, et non dans les palais royaux (Arnauld *et al.,* 2014). Enfin, la période d'abandon, à partir de la fin du Xe siècle, ne signifie pas l'abandon de l'habitat – qui continua sûrement avec des matériaux périssables – mais plutôt l'abandon de l'architecture monumentale en pierre, coûteuse et difficile à entretenir. Le dépeuplement de la région a en effet rendu inutile l'expression du prestige dans le bâti, car le prestige n'était plus nécessaire à la formation des alliances sur lesquelles s'appuyait la noblesse paysanne.

Au final, et comme l'ont suggéré Michelet *et al.* (2008b), on peut appliquer à cette organisation socio-politique le modèle ethnologique de la « société à maisons » développé par Levi-Strauss à partir de la fin des années soixante-dix, et la considérer comme une société

atomisée en maisons composées chacune d'une famille élargie habitant une grande résidence et associée à des familles de moindre rang réparties dans les petites unités voisines. La maison correspond alors à un « héritage matériel et spirituel comprenant la dignité, les origines, la parenté, les noms et les symboles, la position, la puissance et la richesse » ou encore à « une personne morale détentrice d'un domaine composé de biens matériels et immatériels, qu'elle perpétue par la transmission de son nom, de sa fortune et de ses titres en ligne réelle ou fictive » (Michelet *et al.,* 2008b). Cette organisation en maisons reste une exception dans le monde maya classique et souligne l'intérêt patrimonial du secteur étudié, non seulement par cette singularité, mais surtout parce que cette singularité est exprimée dans le style architectonique qui le caractérise.

2.3. Le style architectonique Río Bec

Pour ne pas parler des travaux pionniers de Merwin et Thomson au début du XXe siècle, qui furent les premiers à souligner l'existence d'un style régional, le style architectonique Río Bec a commencé à être défini dans les années soixante-dix, sur la base des différents aspects architecturaux et ornementaux qui le caractérisent, recensés par Gendrop (1983), mais aussi en le comparant avec le style voisin du Chenes (Potter, 1973 et 1977). Les travaux plus récents (Arnauld *et al.,* 2013 et 2014 ; Michelet *et al.,* 2013) précisent les principaux traits existant dans le secteur : le style Río Bec se caractérise par des palais quadrangulaires comportant de multiples chambres équipées de banquettes maçonnées, bardés de tours jumelles aux extrémités des édifices. La quasi-absence de terrain de jeu de balle, de stèles et de monuments porteurs d'inscription (Taladoire, 2014) ainsi que de temples-pyramides (en dehors de rares occasions) est également caractéristique du secteur. Les parements, majoritairement lisses, présentent fréquemment des panneaux décorés d'éléments iconographiques, corniches de pierres sculptées ou panneaux à damiers. La structure 5N2 du site éponyme est un édifice à la fois « paradigmatique » (Michelet *et al.,* 2013) et original, présentant les principaux traits du style architectonique Río Bec tout en comportant un temple-pyramide (Fig. II-14).

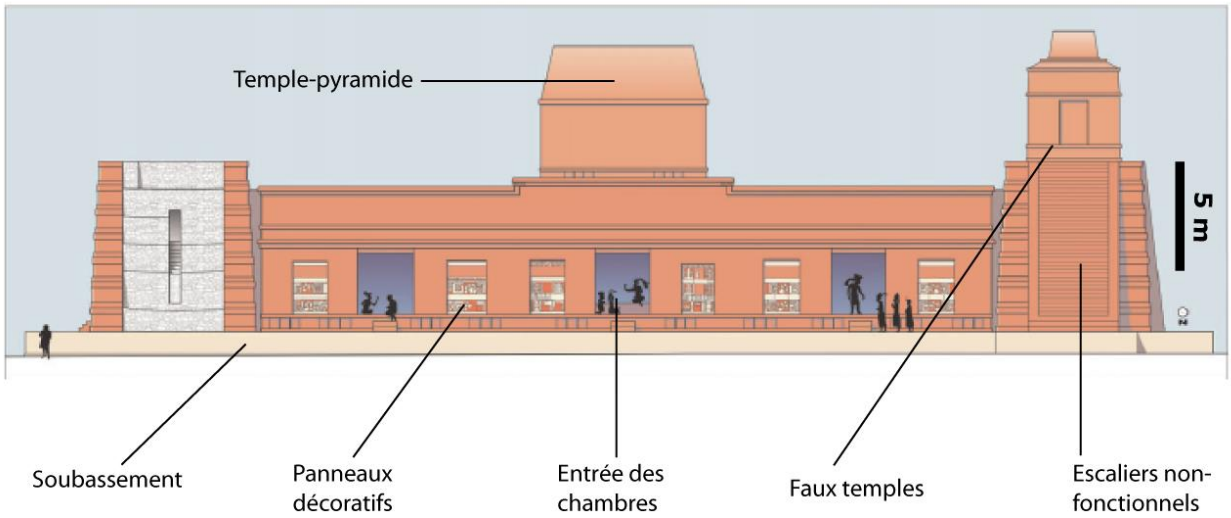


Fig. II-14. Reconstitution de l'édifice 5N2 à Río Bec, indiquant les principales caractéristiques du style architectonique éponyme (modifié d'après Michelet *et al.*, 2013).

Afin de présenter ici les principales caractéristiques qui font du style architectonique Río Bec une exception archéologique et de souligner leur potentiel au regard de la méthodologie adoptée, nous nous pencherons sur les systèmes de tours jumelles, les chambres multiples composant les édifices, et sur les éléments décoratifs extérieurs.

Les systèmes de tours jumelles

Le style architectonique Río Bec a longtemps été essentiellement défini par les systèmes de tours jumelles qui flanquent certains édifices et en font un style largement reconnaissable, même si Carrasco Vargas (1993) a pu observer des édifices comportant des tours dans la région Chenes. Ces tours sont bâties de plusieurs corps de pierre (sept dans le cas de la structure 5N2 de Río Bec), de taille décroissante vers le haut, en forme de rectangle aux angles arrondis. Elles imitent les pyramides que l'on peut retrouver au Petén, et sont surmontées par des « faux temples » en trompe-l'œil (qui ne sont en réalité qu'une façade de temple), auxquels un escalier non fonctionnel (composé de marches étroites et impraticables) prétend accéder (Fig. II-15). Ces faux temples ont une fonction symbolique et décorative, les différentes unités résidentielles du secteur se devant de rivaliser de splendeur et de faire figurer leur puissance dans leurs réalisations architecturales.

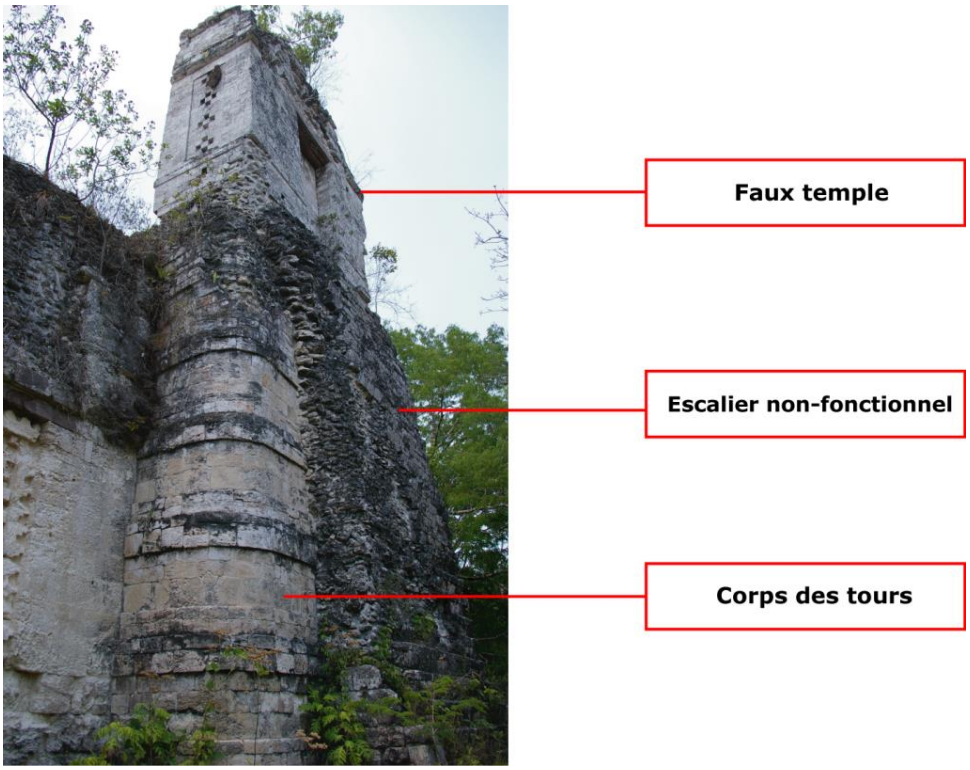


Fig. II-15. Différentes caractéristiques de la tour nord de l'édifice 6N1 à Río Bec.

L'intérêt des tours jumelles du secteur Río Bec réside dans leur construction en plusieurs corps. En effet, après l'abandon des structures et leur recouvrement par un monticule de terre et de végétation, les différents corps des tours sont progressivement dégagés par les archéologues, ce qui permet d'avoir une chronologie claire de leurs opérations. De plus, les corps situés en hauteur sont également susceptibles d'être davantage exposés aux intempéries que les corps situés près du sol, et sont des éléments architecturaux comparables.

Les chambres multiples

Les unités résidentielles les plus importantes du secteur Río Bec sont composées de chambres multiples (Fig. II-16), organisées selon deux principaux schémas pour les édifices en pierre : en tandem ou tripartite, c'est-à-dire un corps central et deux ailes latérales (Gillot, 2018). Ce dernier, largement dominant dans le secteur Río Bec, a été également repéré dans les sites du Petén, du Puuc et du Chenes.

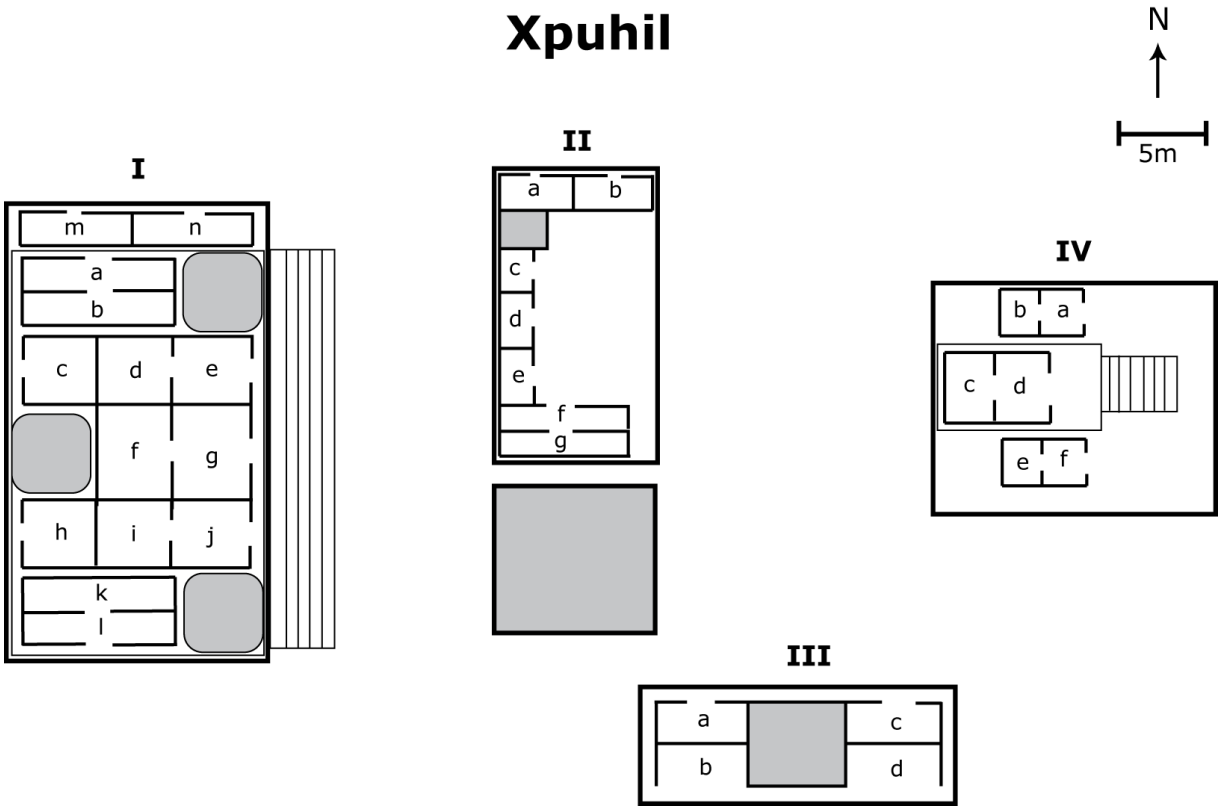


Fig. II-16. Vue d'ensemble du site de Xpuhil, montrant l'organisation en édifices multi-pièces comprenant plusieurs chambres, agencées selon le format tripartite.

Les murs de ces différentes pièces ont une épaisseur d'environ 1 m, pouvant aller jusqu'à 1,60 m dans les édifices multi-pièces, notamment lorsqu'ils soutiennent les voûtes de plusieurs chambres. Les voûtes mayas, souvent qualifiée de voûtes à « encorbellement », correspondent dans le secteur Río Bec à des voûtes en blocage de maçonnerie (Gillot, 2018), consistant en l'enserrement entre deux parements de deux demi-voûtes constituées chacune d'un cœur de blocage, assurant maintien et intégrité de l'ensemble, fermées à leur jonction par une dalle sommitale appelée *tapa de boveda* . Le sol est souvent surélevé pour produire des banquettes qui servent d'aménagements intérieurs, et les accès aux pièces sont surmontés d'un linteau de bois (Fig. II-17).

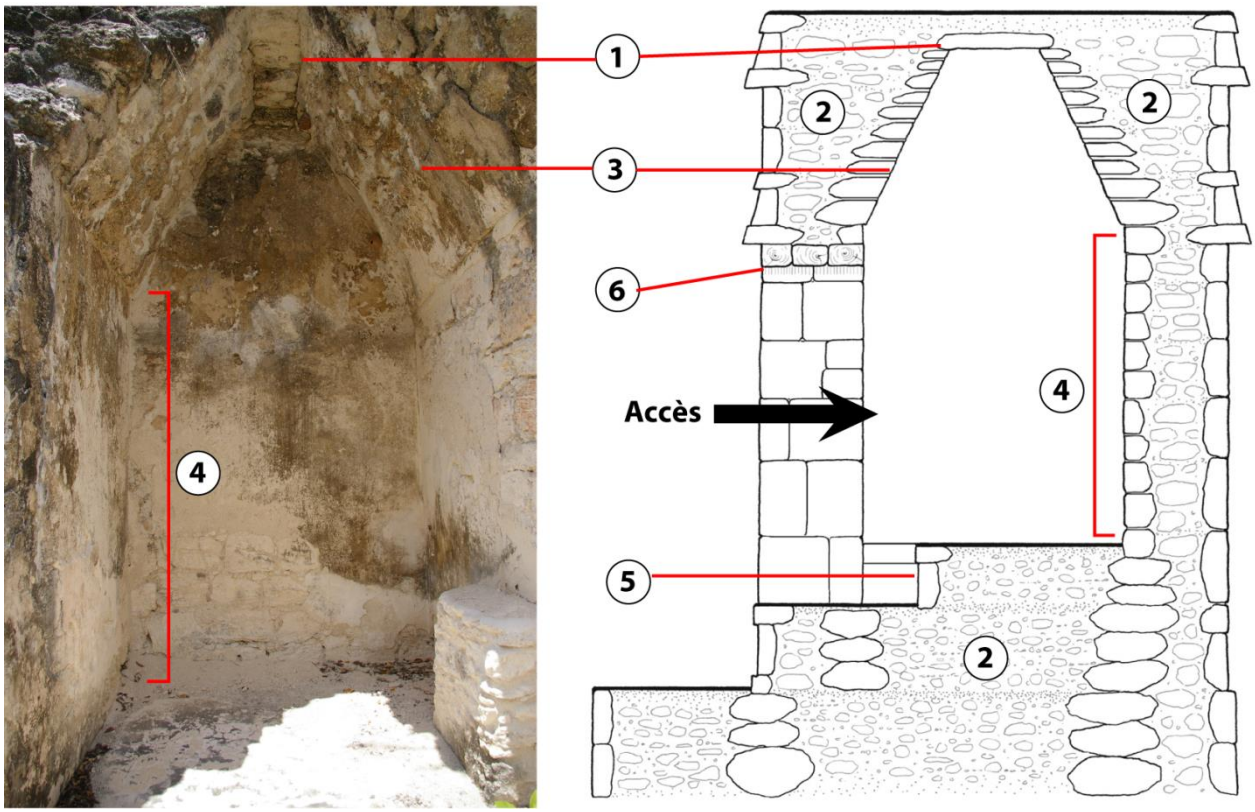


Fig. II-17. Schéma des principaux composants des chambres du secteur Río Bec (à gauche, cliché de l'auteur, à droite figure de Gillot, 2018). 1 : dalle sommitale de la voûte (*tapa de boveda*), 2 : blocage de maçonnerie, 3 : demi-voûtes, 4 : parement, 5 : surélévation d'aménagement intérieur, 6 : linteau de bois surmontant les accès.

L'intérêt de l'organisation multi-pièces des édifices du Río Bec réside dans la reproduction de ce schéma architectural dans les trois sites qu'il nous a été donné d'étudier, ce qui nous fournit un corpus important d'unités architecturales semblables et comparables entre elles en termes de morphologie et de technique de construction. En effet, malgré d'acceptables variations en termes de surface et d'épaisseur, les parements des chambres qui composent les édifices du secteur Río Bec ont dans leur grande majorité été conçus et construits de la même manière, et présentent les mêmes éléments constitutifs.

Éléments décoratifs extérieurs

Bien que les parements extérieurs du secteur Río Bec soient majoritairement lisses, les édifices arborent parfois des éléments décoratifs en façade. Parmi ces derniers, les plus impressionnants sont les portes zoomorphes que l'on peut observer à Chicanná ou Hormiguero (Fig. II-18). Composées d'une multitude d'éléments sculptés dont l'ensemble

représente le monstre terrestre, aux traits à la fois félins et sauriens, leur fonction est mythologique et symbolique. L'entrée dans le temple serait alors assimilée à une « absorption » par le monstre de la Terre, et à un accès au monde souterrain. Si certains éléments de ces portes zoomorphes peuvent être retrouvés dans le corpus de sites étudiés, il est rare que cette décoration englobe l'ensemble de l'édifice comme dans les sites cités précédemment.

Fig. II-18. Porte zoomorphe de l'édifice II de Chicanná.

Les crêtes faîtières qui surmontent un certain nombre de bâtiments et dont la fonction est encore une fois tout à fait symbolique sont également observées dans le secteur Río Bec, notamment celle qui orne le sommet de l'édifice 6N1 du site éponyme (Fig. II-19). Ces crêtes faîtières correspondent à un mur simple d'une épaisseur d'environ 1 m, ajouré en plusieurs endroits, et qui supportait des décorations faites de stuc dont il ne subsiste aujourd'hui que très peu d'éléments (Gillot, 2018).

Fig. II-19. Les crêtes faîtières qui surmontent l'édifice 6N1 de Río Bec.

Les panneaux décoratifs qui ornent les façades des grands édifices du secteur Río Bec sont les éléments qui nous ont le plus intéressés. On peut en distinguer deux types : les panneaux iconographiques, représentant des motifs en grecques et des cabosses de cacaoyer, comme sur l'édifice 5N2 de Río Bec (Fig. II-20), et les panneaux à damiers que l'on trouve sur la structure 6N1 de Río Bec et sur la structure II de Becán (Fig. II-21).

Fig. II-20. Panneaux iconographiques sur la façade nord de l'édifice 5N2 de Río Bec, montrant des cabosses de cacaoyer encadrées par des motifs en grecques.

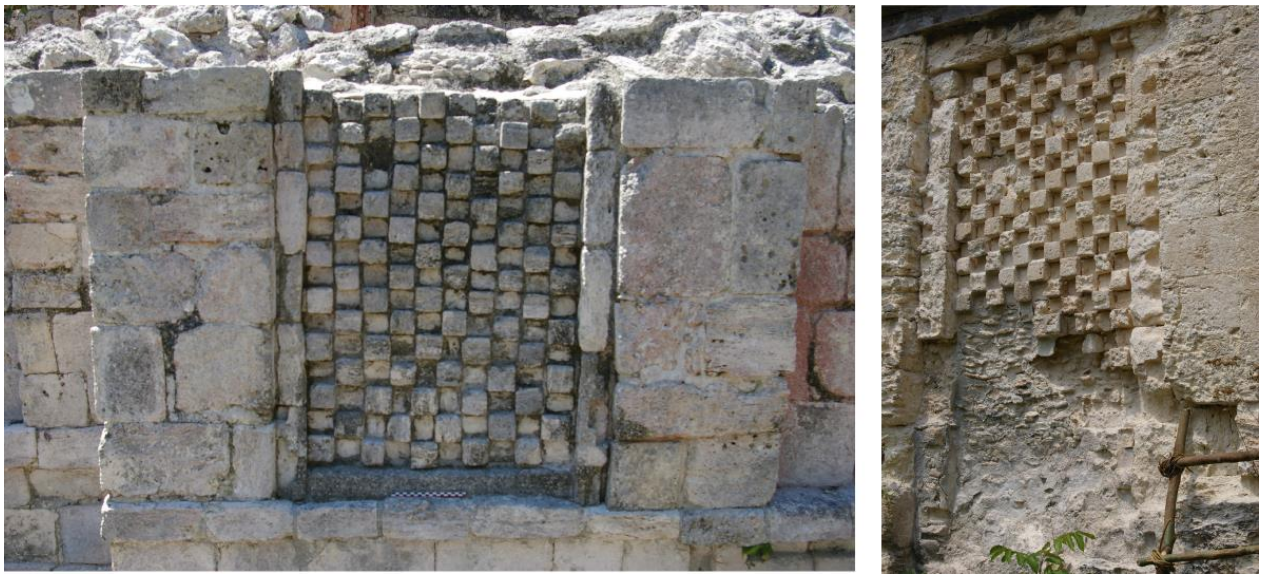


Fig. II-21. Panneaux à damiers sur la façade est de la structure II de Becán (à gauche), et sur la façade est de la structure 6N1 de Río Bec.

Les panneaux à damiers, sur lesquels notre intérêt s'est particulièrement porté, ont un grand potentiel méthodologique en termes d'acquisition de données sur des motifs sculptés répétitifs, retrouvés en plusieurs endroits et sur plusieurs sites du secteur étudié. Ils représentent donc à la fois un élément original du style iconographique du secteur, et des objets sur lesquels un grand nombre de données peuvent être acquises, et dont les modalités de détérioration seront susceptibles d'être finement analysées.

Ce bref aperçu des différents aspects et éléments qui constituent ensemble un style architectonique unique n'est bien sûr pas exhaustif. On peut également citer les corniches ornementales sur lesquelles ont travaillé Straulino *et al.* (2013), et il serait également possible d'aller bien plus loin en termes de caractérisation architecturale des édifices qu'il nous a été donné d'étudier. Si les modalités de construction des édifices du secteur archéologique Río Bec ont été extensivement étudiées par Gillot (2018) dans un travail très complet, il a été choisi ici de présenter les éléments principaux qui font du secteur Río Bec un ensemble de sites archéologiques à haute valeur patrimoniale, et de souligner la potentialité méthodologique de leurs éléments constitutifs.

3. Les sites archéologiques retenus

Plusieurs critères ont été retenus pour sélectionner les sites archéologiques qui ont été étudiés dans le présent travail. Dans un premier temps, l'appartenance au style architectonique Río Bec était indispensable afin de garantir, d'une part, une unité architecturale dans les structures étudiées et, d'autre part, l'unité patrimoniale des sites archéologiques, caractérisés par le même enjeu de conservation. Dans un deuxième temps, la disponibilité de la documentation relative aux fouilles archéologiques et aux restaurations dont les vestiges ont fait l'objet a présidé à leur sélection, en raison du caractère décisif de l'étape d'anamnèse des structures dans la démarche adoptée. Enfin, la présence des éléments architecturaux cités précédemment a été déterminante en raison du potentiel de développement de la méthodologie qu'ils induisent. Après des visites préliminaires effectuées au printemps 2013, il a été choisi, pour les raisons que nous venons de citer, de concentrer les recherches sur le site de Xpuhil et le groupe annexe Xpuhil II, le groupe est du site de Becán (cinq structures), et quatre structures du site éponyme Río Bec (5N2, 6N1, 6N2 et 7N1). Ces trois sites archéologiques, sur lesquels ont été collectées les données utilisées dans ce travail, se trouvent dans un rayon de 20 km autour de la localité de Xpujil, dans le sud-est de l'état de Campeche (Fig. II-22).

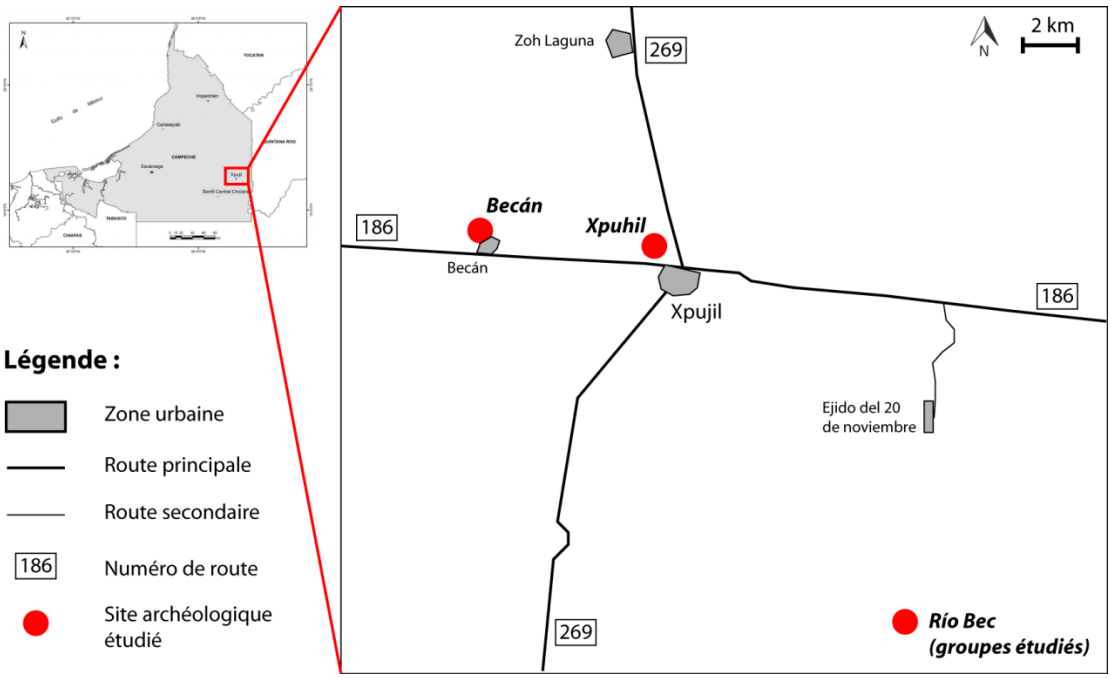


Fig. II-22. Localisation des sites archéologiques étudiés, autour de la localité de Xpujil.

Dans cette section seront présentés les sites archéologiques étudiés en indiquant les structures qui ont été sélectionnées et les raisons qui ont présidé aux choix qui ont été faits. L'histoire récente des sites, depuis leur redécouverte et leur mise en valeur, sera présentée en détail dans le chapitre IV (p. 129), consacré aux résultats de l'anamnèse des structures étudiées.

3.1. Becán

Le site de Becán est le site le plus monumental de la région. En effet, à l'inverse de la plupart des sites du secteur Río Bec, Becán possède un centre nucléé qui concentre les fonctions politiques et religieuses, organisé autour de plusieurs groupes monumentaux (Fig. II-23). Ce centre civique et cérémoniel s'étend sur environ 2 km de diamètre, et un fossé défensif entoure la cité. Ce fossé constituait un obstacle infranchissable au regard des technologies militaires de l'époque, ce qui suppose que les habitants de Becán avaient besoin de se protéger d'attaques extérieures ; c'est un exemple unique d'ouvrage défensif dans l'aire culturelle maya (Sprajc, 1995). Becán était un important centre de pouvoir de la région, et bien que sa trajectoire d'occupation soit extrêmement longue, de 900 av. J.-C. jusqu'au début du XIIIeme siècle si l'on se réfère à la séquence céramique établie par Ball (1973), la plupart des édifices majeurs ont été construits entre 570 et 630, pendant la période d'apogée du style Río Bec (Sprajc, 1995).

Les structures appartenant au groupe est ont été sélectionnées dans le présent travail en raison des chambres multiples qui les composent et de la présence de panneaux à damiers sur la façade est de la structure II. Ce groupe monumental s'inscrit donc dans la tradition architecturale du secteur Río Bec, et nous permet d'étudier cinq structures : I-A, II, III, IV et V-A. Ces dernières ont toutes fait l'objet d'interventions de restauration depuis leur redécouverte et ces interventions ont été consignées dans des rapports disponibles à l'*archivo técnico* de l'INAH à Mexico D.F. Enfin, le site de Becán est très accessible, situé en bordure de la route 186 qui relie Escárcega à Chetumal, à une dizaine de kilomètres à l'ouest de Xpuhil.

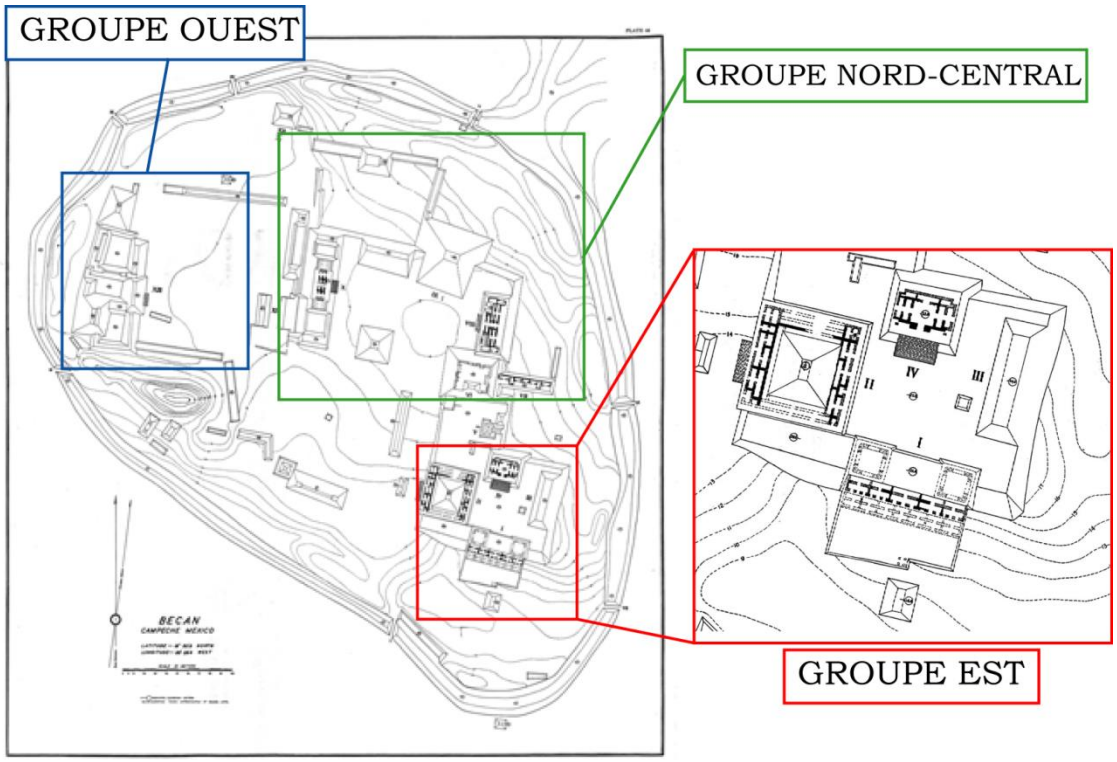


Fig. II-23. Carte de Becán dressée par la *Carnegie Institution*, modifiée pour localiser les groupes identifiés lors de la redécouverte du site (Ruppert et Denison, 1943).

3.2. Xpuhil et Xpuhil II

Le site de Xpuhil, situé à la périphérie de la localité du même nom (parfois appelée « Xpujil ») a connu son apogée entre 500 et 750. L'organisation des principales structures en chambres multiples, et le système de tours atypique de la structure I (avec deux tours latérales et une tour arrière et centrale) le rattachent clairement au style architectural Río Bec (Fig. II-24). A l'inverse de Becán et comme la plupart des sites du secteur, Xpuhil est caractérisé par une organisation sans nucléation, avec de grandes structures monumentales espacées les unes des autres et sans centre clairement défini.

Le site est composé de quatre principales structures organisées sur une ligne est-ouest, qui ont toutes fait l'objet de campagnes de restauration documentées, au cours de la même période que Becán. Xpuhil est également très facile d'accès, et l'annexe Xpuhil II, qui se réduit à une structure enfouie dans la forêt à quelques centaines de mètres du site

principal, est également accessible sans trop de peine, à condition de savoir où elle se trouve.

Fig. II-24. La structure I de Xpuhil et son système de tours atypique.

3.3. Río Bec

Le site éponyme de Río Bec est celui par lequel le secteur et le style archéologique ont été définis. Les 72 groupes monumentaux reconnus jusqu'à présent, dégagés, restaurés et étudiés en grande majorité lors des campagnes du projet Río Bec entre 2002 et 2010, s'étendent sur une véritable micro-région de 100 km² au cœur de la forêt tropicale. Parmi ce vaste ensemble, il a été choisi de sélectionner les structures 5N2, 6N1, 6N2, et 7N1. Ces dernières, au-delà de correspondre à des centres de pouvoir importants de la noblesse paysanne qui se développe dans le secteur, sont également emblématiques du style architectonique Río Bec, notamment les structures 5N2 et 6N1 (voir les figures II-15, II-19 et II-21 du présent chapitre), et rassemblent toutes les caractéristiques typiques du secteur :

systèmes de tours jumelles avec de faux temples au sommet, organisation en chambres multiples et panneaux décoratifs extérieurs, propices au développement de la méthodologie adoptée.

En revanche, le site de Río Bec présente des difficultés d'accès. Situé à 8 km de piste de la première localité, *l'ejido del veinte de noviembre*, au cœur de la forêt tropicale, l'accès au site dépend largement de conditions climatiques sèches et nécessite l'accompagnement d'un guide local, connaissant les ramifications du chemin qui y mène.

Conclusion du chapitre II

Le travail entrepris ici s'inscrit donc pleinement dans une de ces « terres de bonnes espérances » chères à Pierre Gourou (1982), au cœur d'une péninsule tropicale chargée de l'histoire d'une civilisation fascinante. Les Basses Terres mayas, connues pour avoir hébergé les puissantes cités de Calakmul et de Tikal, ont aussi vu la naissance et le développement d'une organisation socio-économique et politique exceptionnelle dans l'aire culturelle maya : le Río Bec. Ce secteur archéologique qu'il nous a été donné d'étudier rassemble un grand nombre d'aspects intéressants pour le géomorphologue étudiant la détérioration de la pierre monumentale.

Dans un premier temps, les facteurs extrinsèques et intrinsèques joue largement en faveur d'une érosion délétère des matériaux de construction, avec des structures situées dans un climat tropical de savane où les paramètres environnementaux sont extrêmement agressifs et susceptibles d'accentuer l'efficacité des processus d'érosion, tant chimiques que mécaniques. De surcroît, les vestiges du secteur Río Bec ont été construits avec des matériaux de construction issus des formations calcaires locales, lesquelles consistent en des croûtes calcaires s'étant développées aux dépens de la roche mère, donc de formations résiduelles et secondaires dont les caractéristiques de durabilité et de vulnérabilité sont autant de faiblesses dans un tel contexte climatique.

Dans un second temps, le caractère unique de l'organisation politique et socio-économique du Río Bec est traduit dans l'architecture des vestiges du secteur, dont la préservation constitue un fort enjeu patrimonial. Pour cette raison, les sites archéologiques sélectionnés ont fait l'objet de multiples campagnes de restauration et d'interventions humaines variées, qui sont largement documentées dans des rapports accessibles qui rendent possible la première étape d'anamnèse des structures. Enfin, les nombreux aspects qui caractérisent le style architectural Río Bec permettent le développement de la méthodologie adoptée pour répondre au questionnement, et se retrouvent dans la plupart des structures du secteur, rendant un certain nombre de résultats comparables entre eux en raison de l'unité architecturale du corpus retenu.

Chapitre III

Méthodologie

> *« D'une opération qui ne demande que de la patience, comme la trituration, on peut rapprocher des opérations qui demandent du temps, comme les lentes et douces cuissons.»*
>
> Gaston BACHELARD, *La formation de l'esprit scientifique,* 1938.

Si la méthodologie développée dans ce travail est essentiellement fondée sur les outils et techniques de la géomorphologie, elle emprunte certaines méthodes aux sciences des matériaux, intègre des techniques innovantes d'imagerie 3D, et inclut des recherches en archives et des analyses statistiques. Le développement de cette méthodologie s'inscrit dans une volonté de réponse aux objectifs énoncés en introduction, qui reposent sur l'approche systémique de la détérioration de la pierre monumentale adoptée dans ce travail, en lien avec le déroulement des missions sur le terrain. Le caractère interdisciplinaire de la thématique abordée a en outre nécessité le développement d'un certain nombre de collaborations (Tab. III-1). Les missions de terrain ont été menées dans l'état de Campeche et à Mexico D.F. de février à avril en 2013 et 2014, et un retour dans les archives a été effectué à Mexico en novembre 2016. L'ensemble du travail a été effectué en accord avec les autorités mexicaines en charge de l'archéologie, auxquelles une proposition de projet de recherche a été soumise en janvier 2013, que le lecteur pourra consulter en annexe (Annexe II, p. 363).

Discipline	Personnes	Organisme / Université	Nature de la collaboration
Archéologie	Dominique Michelet	Archam UMR 8096 - Paris I	Contexte archéologique
			Accès aux rapports du projet Río Bec
			Connaissance du terrain
			Aspects légaux et administratifs
Géologie	Gilles Fronteau	Gegenaa - EA 3795 - URCA	Analyses pétrographiques
	Sergey Sedov	UNAM - Mexico D.F.	Analyses pétrographiques
	M. Benbakkar JM. Hénot	LMV - UMR 6524 - UCA - OPGC	Analyses pétrographiques
Restauration	Luisa Straulino	INAH	Contexte archéologique
			Interventions sur le bâti
			Analyses pétrographiques
Microbiologie	Otto Ortega-Morales	UAC - Campeche	Colonisation biologique
Logistique	Membres du CEMCA	CEMCA - USR 3337 - CNRS-MAE	Logement
			Appui logistique et administratif

Tab. III-1. Récapitulatif des principales collaborations développées lors des recherches.

Le présent chapitre s'organisera en fonction des quatre étapes du travail effectué : l'anamnèse des structures étudiées, la caractérisation des facteurs de contrôle, le diagnostic de la dynamique érosive, et la quantification de l'érosion. Pour chacune de ces étapes, nous présenterons en détail la méthodologie adoptée et les stratégies de collecte et de traitement des données.

1. Anamnèse des structures étudiées

L'anamnèse des structures étudiées a pour principal objectif l'acquisition du contrôle chronologique, c'est-à-dire la connaissance fine et précise des dates des interventions dont l'édifice a fait l'objet, de sa redécouverte et son dégagement du monticule de terre ou du couvert forestier, jusqu'aux restaurations ultérieures. Le terme d'anamnèse renvoie à l'analogie entre l'étude de la détérioration de la pierre monumentale et le diagnostic médical d'un patient, analogie évoquée par Fitzner (2004) et développée par Smith et Prikryl (2007). Le corollaire de l'acquisition du contrôle chronologique est l'identification et la classification des trajectoires d'interventions des structures étudiées. Cet objectif permet la synthèse des informations recueillies et répond à la construction d'un cadre d'analyse permettant la mise en perspective des résultats correspondant aux autres objectifs du travail. Nous aborderons dans un premier temps les recherches en archives qui ont été menées avant de détailler dans un deuxième temps la méthode de classification des trajectoires d'intervention.

1.1. Recherches en archives

Afin de collecter les informations nécessaires à l'acquisition du contrôle chronologique, il a fallu se pencher sur les rapports de fouilles archéologiques et de restauration concernant les sites du secteur étudié. Une plongée préliminaire dans les rapports du projet Río Bec a été réalisée au début des recherches, en novembre 2012, lors d'un séjour d'une semaine au laboratoire Archéologie des Amériques, à la MAE de Nanterre. Particulièrement complets et détaillés, ces volumes (Michelet *et al.,* 2004, 2005, 2006, 2007, 2008a et 2009) ont permis une première approche de la chronologie des opérations réalisées sur le site éponyme, ainsi que du contexte archéologique du secteur.

Pour les sites de Becán et Xpuhil, il a fallu effectuer des recherches dans les rapports conservés à l'*archivo técnico* de l'INAH à Mexico D.F. Ces derniers ont été consultés lors du dernier séjour sur place, effectué en novembre 2016. Les rapports des fouilles archéologiques et des restaurations sur les sites de Becán et Xpuhil ont été dactylographiés à la machine à écrire entre les années soixante-dix et quatre-vingt-dix, et compilés dans d'épais volumes. Les informations capitales sur ces deux sites ont donc été difficiles à obtenir.

Il convient également de préciser que les rapports de fouilles et de restauration concernant les différents sites se sont parfois révélés incomplets et que, dans certains cas, la trace écrite d'opérations relevées visuellement sur le terrain n'a pas pu être retrouvée. En effet, l'anamnèse des structures ne peut se réduire à la stricte étude des rapports et des traces écrites mais doit se compléter par un relevé minutieux des interventions constatées *in situ* sur les structures.

1.2. Classification des trajectoires d'intervention

Afin d'identifier les différentes trajectoires d'intervention des structures, il a été indispensable d'effectuer dans un premier temps une typologie des interventions, puis de les recenser avec la plus grande exhaustivité possible, que ce soit *in situ* sur les sites archéologiques ou dans les traces que l'on en retrouve dans les sources bibliographiques et iconographiques. Une fois le contrôle chronologique sur les dates de dégagement et d'interventions ultérieures des structures acquis, et les informations collectées dans les rapports et constatées sur le terrain confrontées, il a été choisi de réaliser des cartographies synthétiques et chronologiques de ces interventions afin de disposer d'un aperçu spatialisé de leur déroulement dans le temps, depuis la redécouverte des structures.

La classification des trajectoires d'intervention réalisée à la fin du travail d'anamnèse s'est largement écartée du cadre d'analyse théorique présenté en introduction après sa confrontation à la réalité complexe du terrain, liée à la temporalité des interventions et à leur localisation, souvent réduite, ne permettant pas d'établir une classification par structure intégrale. Il a été choisi de distinguer pour cette classification deux principales variables : la durée d'exposition des structures aux agents atmosphériques depuis leur dégagement du monticule de terre et de végétation

caractéristiques des ruines oubliées, et un degré d'intervention global, calculé en fonction du nombre d'interventions réalisées. La figure IV-27 (p. 162) synthétise les informations récoltées auxquelles un score a été donné afin d'évaluer ce degré d'intervention : 1 point pour un dégagement ou une intervention ponctuelle, 3 points pour des interventions extensives. Les scores ainsi obtenus ont été croisés avec la durée de l'exposition des structures étudiées depuis leur dégagement et un test statistique par k-moyennes a été réalisé afin de constituer plusieurs groupes correspondant aux trajectoires d'intervention identifiées (Fig. IV-28, p. 163). S'il a été finalement difficile de prendre en compte la diversité des interventions – et notamment des opérations de restauration – dans la classification réalisée en anamnèse, de nombreuses informations les concernant ont pu être récoltées. Une attention particulière leur a ainsi été accordée lors de l'interprétation des résultats ayant trait au diagnostic qualificatif de la dynamique érosive et à la quantification de l'érosion.

2. Caractérisation des facteurs de contrôle

Afin de mieux comprendre les modalités de détérioration de la pierre monumentale, il est indispensable de caractériser les facteurs de contrôle associés aux processus d'érosion. Nous détaillerons ici la méthodologie adoptée pour chacun des ensembles de facteurs qui nous ont intéressés : les facteurs intrinsèques qui concernent la qualité des matériaux, et les facteurs extrinsèques qui concernent l'environnement bioclimatique.

2.1. Analyses pétrographiques et études de matériaux

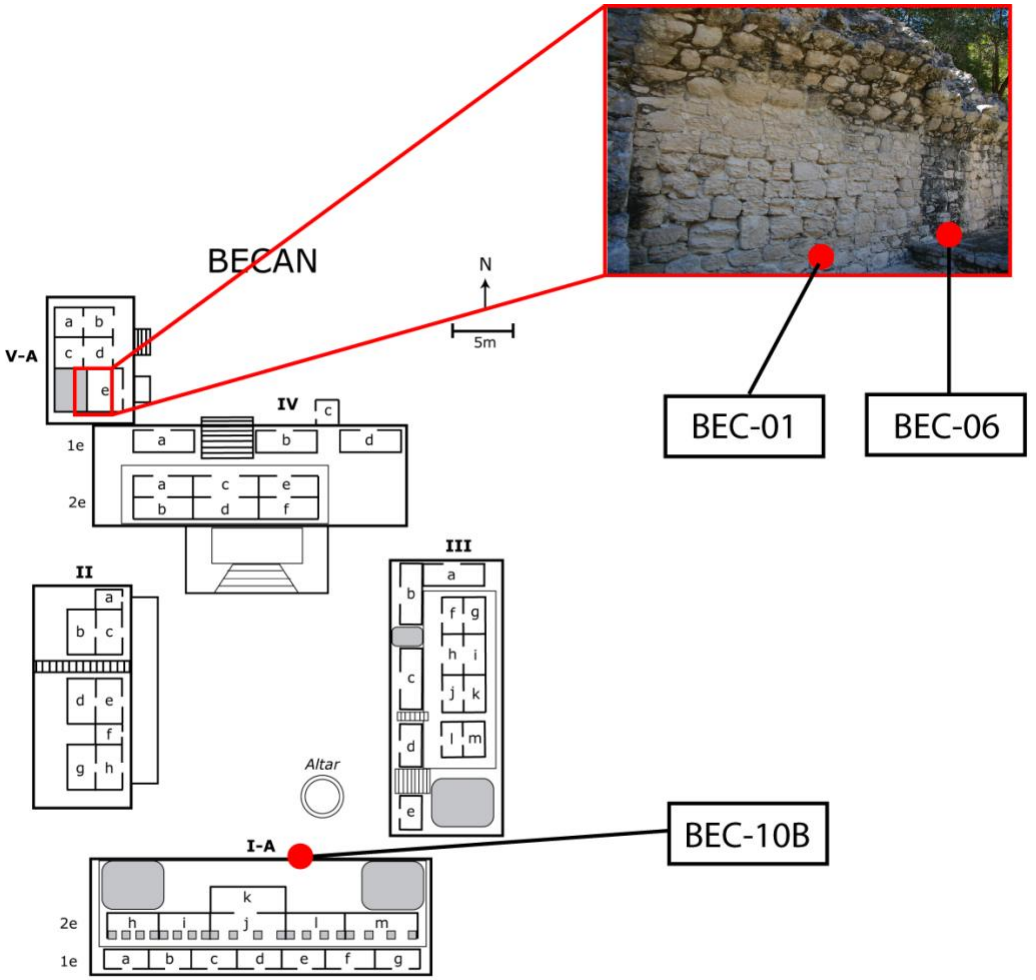
Afin de caractériser les facteurs intrinsèques, des prélèvements ont été effectués sur les structures archéologiques étudiées dans le but d'effectuer des analyses pétrographiques permettant de déterminer la qualité des matériaux de construction, et leurs facteurs de vulnérabilité ou de durabilité face aux processus érosifs.

2.1.1. Liste des échantillons et stratégie de collecte

Les modalités de prélèvement des échantillons ont été largement dépendantes des autorisations données par les autorités en charge des sites archéologiques, imposant le prélèvement de fragments de matériaux préalablement tombés au sol, et d'une taille

n'excédant pas 10 cm³. Une vingtaine d'échantillons a ainsi été collectée selon ces règles lors de la mission de terrain du printemps 2014. Nous ne listerons ici que les neuf échantillons qui ont été analysés et dont les résultats figurent dans ce manuscrit.

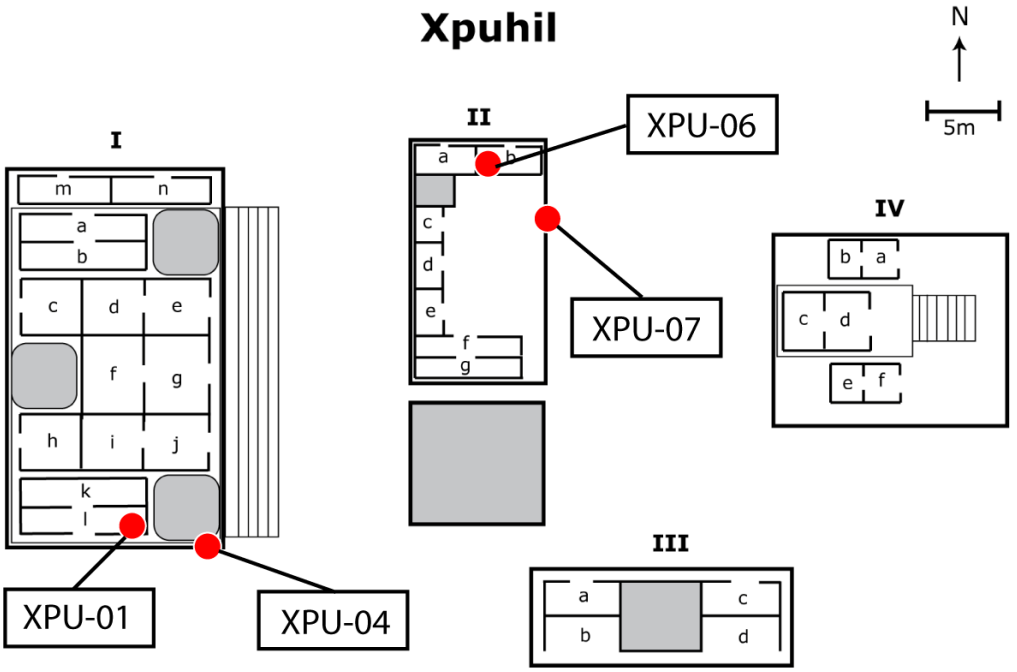
A Becán, les prélèvements se sont concentrés sur des matériaux de construction notamment récoltés au pied des deux parties du mur de la structure V-A, élément largement étudié dans ce travail, lesquelles présentent un état de conservation variable. Un échantillon de matériau de construction visuellement différent de la majorité des calcaires observés sur le site a également été prélevé sur la façade nord de la structure I-A (Fig. III-1). Les trois prélèvements effectués sur ce site ont été observés en lames minces, et BEC-10B a également fait l'objet d'une analyse par diffraction des rayons X.



Code	Site	Localisation	Description	Analyses
BEC-01	Becán	Structure V-A	Matériau de construction calcaire	Lame mince
BEC-06	Becán	Structure V-A	Matériau de construction calcaire	Lame mince
BEC-10B	Becán	Structure I-A	Matériau de construction calcaire	Lame mince - XRD

Fig. III-1. Localisation des prélèvements effectués à Becán.

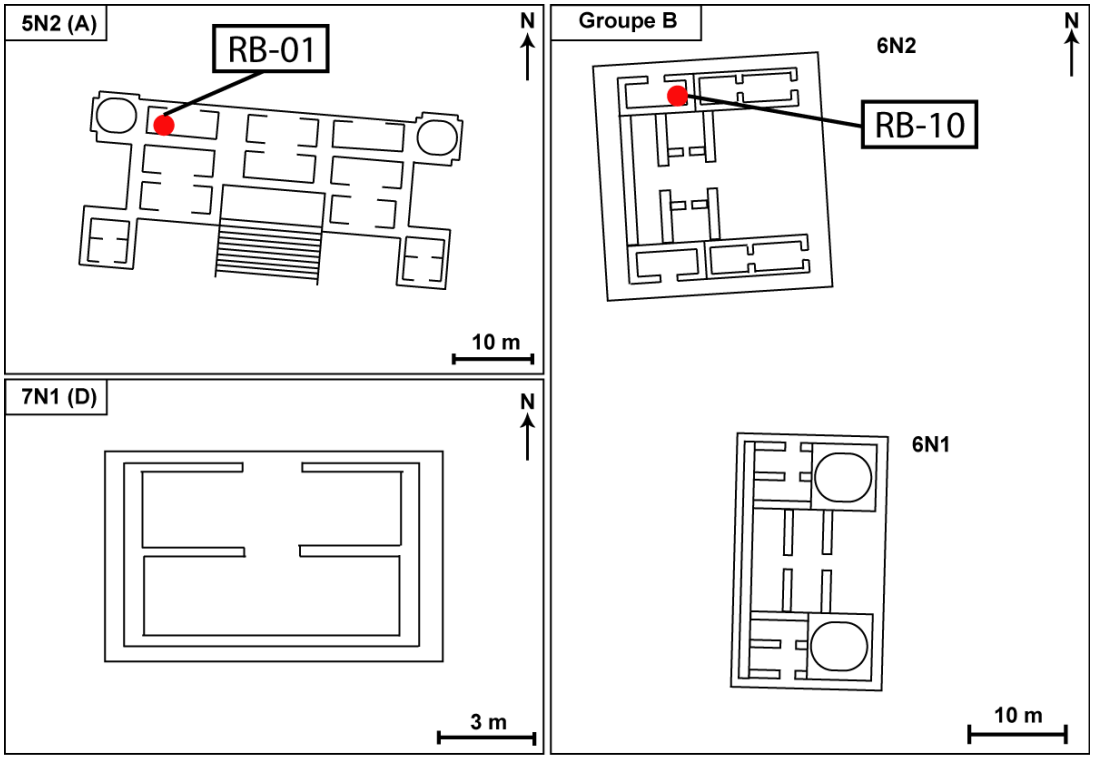
A Xpuhil, quatre des prélèvements effectués ont été analysés. Ces derniers correspondent à des portions de bâti ayant attiré notre attention en raison d'une détérioration avancée ou d'une originalité de la colonisation biologique (Fig. III-2). Trois échantillons sont constitués de matériaux de construction calcaires qui ont été observés en lames minces, et un de ceux-ci a été analysé par diffraction des rayons X. XPU-07, quant à lui, est un prélèvement de biofilm noir fermement accroché à une écaille de desquamation que nous avons choisi d'observer en microscopie électronique par balayage afin de caractériser le biofilm et son implantation sur l'épiderme rocheux.



Code	Site	Localisation	Description	Analyses
XPU-01	Xpuhil	Structure I	Matériau de construction calcaire	Lame mince
XPU-04	Xpuhil	Structure I	Matériau de construction calcaire	Lame mince
XPU-06	Xpuhil	Structure II	Matériau de construction calcaire	Lame mince - XRD
XPU-07	Xpuhil	Structure II	Biofilm noir sur fragment calcaire	MEB

Fig. III-2. Localisation des prélèvements effectués à Xpuhil.

En ce qui concerne le site éponyme de Río Bec, deux prélèvements de matériaux de construction calcaires ont été prélevés sur les structures 5N2 et 6N2, afin de les observer en lames minces et de déterminer leur composition chimique par diffraction des rayons X (Fig. III-3).



Code	Site	Localisation	Description	Analyses
RB-01	Río Bec	Structure 5N2	Matériau de construction calcaire	Lame mince - XRD
RB-10	Río Bec	Structure 6N2	Matériau de construction calcaire	Lame mince - XRD

Fig. III-3. Localisation des prélèvements effectués à Río Bec.

Les échantillons prélevés lors de cette campagne de terrain ont été préparés pour l'observation en lames minces et analysés par diffraction des rayons X à l'*Instituto de Geología* de la UNAM (*Universidad Autonoma de México)* à Mexico. Ce choix a été motivé par la volonté de développer des collaborations avec des chercheurs mexicains, et de conserver les échantillons récoltés sur place.

2.1.2. Observations en lames minces

Les observations en lames minces ont été réalisées en trois temps. Une première approche des matériaux a été conduite en mars-avril 2014, dès la finalisation de la préparation des échantillons à l'*Instituto de Geología* de la UNAM à Mexico D.F., sous la conduite de Sergey Sedov, géologue, et avec l'aide de Luisa Straulino, restauratrice de l'INAH, à l'aide d'un microscope pétrographique Olympus BX51. Ces premières observations ont conduit à l'identification des principales textures et des composants retrouvés dans les échantillons, et ont permis de constituer une connaissance de base des matériaux qu'il a fallu ensuite consolider par des recherches bibliographiques.

Dans un second temps, de nouvelles observations ont été menées au laboratoire Geolab de Clermont-Ferrand (UMR 6042, UCA-CNRS), à l'aide du microscope pétrographique Leica DMLP, et en suivant un protocole établi par l'auteur :

- caractérisation de la structure sédimentaire de l'échantillon (laminaire, mosaïque, homogène) ;
- caractérisation des différentes textures présentes dans la lame (micritique, sparitique, dolosparitique) ;
- évaluation de la proportion des différentes textures au sein de la lame (abondance de chaque texture en pourcentage) ;
- identification des composants principaux (grains de calcite isolés, oncolithes, argiles) ;
- observation de l'interface roche-atmosphère et de la zone de détérioration superficielle de l'échantillon.

Ce protocole a permis l'identification de différents faciès et l'observation de certains phénomènes spécifiques décrits dans le chapitre V (p. 167).

Dans un troisième temps, un séjour d'une semaine a été effectué au laboratoire GEGENAA (EA 3795, Université de Reims-Champagne Ardennes) en octobre 2015, sous la direction de Gilles Fronteau, géologue, afin de répondre à un certain nombre de questions soulevées par les observations précédentes et de préciser certaines hypothèses de travail.

2.1.3. Analyses de porosité

L'influence non négligeable des caractéristiques du réseau poreux sur les processus de détérioration de la roche nous a conduit à mener des analyses de porosité sur quatre des échantillons (BEC-01, BEC-06, RB-01 et RB-10) préalablement observés en lames minces. Parmi la large gamme de méthodes disponibles (porosimétrie au mercure, à l'hélium, etc…), il a été choisi, pour des raisons de disponibilité des échantillons, de coût, et de temps de réaliser ces analyses à l'aide d'une méthode numérique et informatisée.

Ces analyses de porosité ont été menées à l'*Instituto de Geología* de la UNAM à Mexico. La méthode choisie consiste à numériser les lames minces en les déposant sur la vitre du scanner avec une feuille de papier de couleur bleue vive en toile de fond. La couleur bleue vive n'étant pas naturellement présente au sein de la lame, les pores apparaissent de cette couleur lors de la numérisation et ne peuvent pas être confondus avec des composants naturels de la roche. La numérisation ainsi obtenue a ensuite été analysée à l'aide du logiciel GSA Image Analyser, un analyseur d'image en deux dimensions spécialement conçu pour les scientifiques, permettant le comptage informatisé d'objets complexes et ramifiés, et l'obtention de données quantitatives sur ces objets (taille, longueur, largeur, surface, périmètre). Ces dernières ont été traitées et présentées sous forme de « boîtes à moustache » à l'aide du logiciel Microsoft Excel.

2.1.4. Analyses géochimiques par diffraction des rayons X

Des analyses géochimiques par diffraction des rayons X ont également été pratiquées afin de caractériser la composition chimique des matériaux prélevés et, bien que le contexte géologique local implique *a priori* la quasi-exclusivité de la calcite dans ceux-ci, d'identifier d'éventuels composants originaux.

Les analyses par diffraction des rayons X ont été effectuées sur les échantillons RB-01, RB-10, XPU-06 et BEC-10B. Ces dernières ont été confiées au *Laboratorio de difracción de rayos X* du *Departamento de Geoquímica* de la UNAM à Mexico. Les échantillons ont été analysés à l'aide du diffractomètre Shimadzu XRD-6000, équipé d'un filtre de nickel et d'un tube de cuivre. Les échantillons ont été réduits en poudre puis homogénéisés dans un mortier d'agate et ont été analysés sur un porte-échantillons aux fractions non-orientées par un intervalle angulaire de 2θ, de 4 à 70°, à une vitesse de 2° par minute. Les résultats bruts obtenus ont été traités à l'aide du logiciel Microsoft Excel et des courbes correspondant aux différents pics analysés ont été construites.

2.1.5. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (M.E.B.) est une technique d'imagerie pétrographique qui permet d'obtenir des images de la topographie d'un échantillon avec une résolution de quelques dizaines de nanomètres. Cette technique est largement utilisée dans un grand nombre de disciplines, et est très courante dans tout ce qui concerne l'étude des propriétés des matériaux. La microscopie électronique à balayage

repose sur le même principe que la microscopie optique, à la différence près que c'est un faisceau d'électrons qui est envoyé sur l'échantillon, l'analysant en balayant de manière linéaire. Les électrons du faisceau (dits « primaires ») « éjectent » ceux de l'échantillon (dits « secondaires »), et renvoient une image de la topographie de la surface analysée. Cette technique permet de mettre en évidence des détails impossibles à déceler autrement grâce à une profondeur de champ supérieure et une bien meilleure résolution.

Les analyses de matériaux par microscopie électronique ont donc été menées afin de bénéficier d'un autre point de vue sur les échantillons, prioritairement observés en lames minces. Ces analyses M.E.B. ont concerné l'échantillon XPU-07, lequel a été étudié dans deux de ses dimensions : d'abord « à plat », la topographie de la surface du matériau a donc pu être étudiée ; ensuite, c'est une section du même échantillon qui a été analysée afin d'obtenir une imagerie à haute résolution de l'interface roche-atmosphère et de la structure interne de l'échantillon.

Les analyses M.E.B. ont été menées au laboratoire « Magmas et Volcans » (UMR 6524, UCA-CNRS) de Clermont-Ferrand, à l'aide du microscope électronique à balayage Jeol 5910LV. Préalablement, une fine couche d'or a été déposée sur l'échantillon par évaporation sous vide afin de rendre sa surface conductrice. Ce procédé de métallisation par l'or permet l'obtention d'une imagerie à plus fort grossissement.

2.2. Monitoring des paramètres climatiques

Afin de caractériser les conditions climatiques dans lesquelles les monuments étudiés évoluent, et d'évaluer le niveau de stress climatique auquel les matériaux de construction sont soumis, le monitoring climatique s'est imposé dans le choix de la méthodologie pour répondre à l'objectif de caractérisation des facteurs de contrôle. Cette méthode implique une mesure directe de la température et de l'humidité enregistrées sur les surfaces rocheuses étudiées.

2.2.1. Matériel utilisé

Les capteurs iButton de modèle DS1923, fabriqués par Maxim Integrated, utilisés dans ce travail sont de petite taille (1,74 cm de diamètre pour 0,6 cm de largeur), légers (environ 3 grammes) et se collent facilement aux surfaces rocheuses à l'aide de pâte

collante (Fig. III-4). A la facilité logistique qu'offre ce matériel s'ajoute une bonne résolution ainsi qu'une précision tout à fait correcte (±0,5°C pour la température et jusqu'à ±0,04% d'humidité relative, selon le fabricant), et une capacité de stockage permettant de collecter jusqu'à 4096 données appariées.

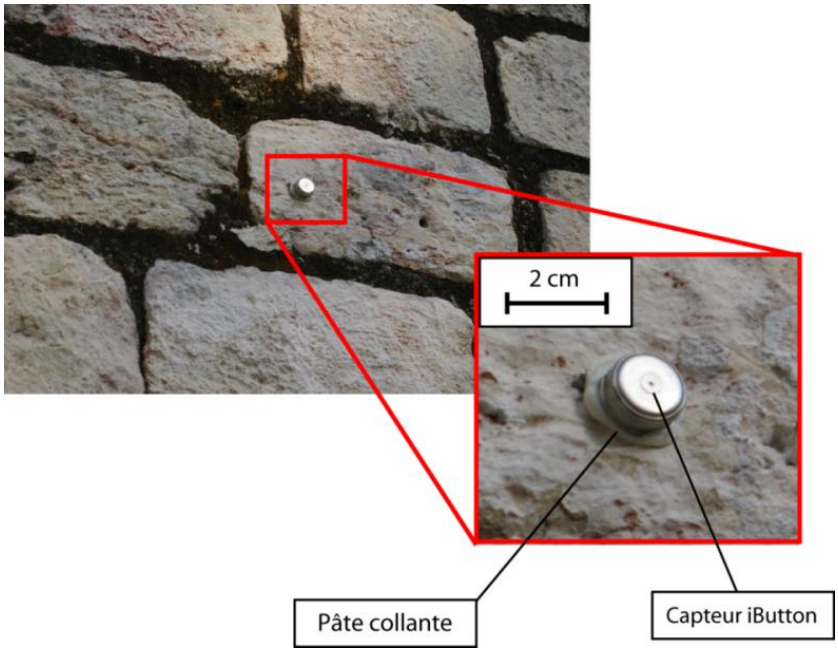


Fig. III-4. Capteur iButton sur une des surfaces rocheuses étudiées.

En revanche, les capteurs iButton sont susceptibles de tomber de la surface mesurée en raison des conditions météorologiques ou lorsqu'ils ont mal été fixés par l'utilisateur. De plus, même si ces objets restent discrets, ils peuvent être intentionnellement retirés de la surface mesurée par des visiteurs malveillants ou tout simplement curieux, notamment lorsqu'ils sont placés à hauteur d'homme. Ainsi, il est indispensable, pour éviter les pertes de matériel et de données, de bien choisir l'emplacement des capteurs, qu'ils ne soient ni trop visibles ni trop cachés (la pertinence de la mesure restant un objectif prioritaire, et il est important de fixer les capteurs sur une surface verticale et exposée, afin d'éviter les effets d'abri), et de les fixer avec soin, surtout lorsqu'on les laisse pendant un certain temps sur le terrain.

Le monitoring climatique a par exemple été utilisé pour établir une corrélation entre des taux élevés d'humidité relative et un nombre important de visiteurs dans le temple d'Al Khazneh sur le site archéologique de Pétra en Jordanie (Paradise, 2005). Les iButton ont été quant à eux utilisés avec un bilan très positif dans de nombreuses disciplines, que ce soit de manière expérimentale dans un environnement contrôlé

(Hubbart *et al.,* 2005) ou sur le terrain pour étudier les interactions entre un cours d'eau et les eaux souterraines (Johnson *et al.,* 2005), et même en herpétologie pour mesurer la température de micro-habitats (Angilletta et Krochmal, 2003). Enfin, ces mêmes capteurs ont été utilisés pour démontrer le changement des paramètres climatiques induit par le retrait du couvert forestier autour des structures archéologiques d'Angkor au Cambodge par André *et al.* (2012).

2.2.2. Stratégie de collecte

La collecte des données de monitoring climatique s'est opérée en deux temps, et sur trois sites de mesures en fonction des objectifs retenus pour cette étape de travail (Tab. III-2).

Objectifs / Sites	Xpuhil (Structure I)	Xpuhil II (Structure I)	Becán (Structure V-A)
Évaluer la saisonnalité des paramètres climatiques	●		
Comparer les ambiances climatiques forestières et dégagées	●	●	
Comparer les orientations des structures	●		
Identifier des variations de régimes climatiques induites par des interventions humaines			● ●

Mesure	Début	Fin	Durée	Pas de temps
● Courte	11/03/2013 12h59	17/03/2013 05h59	5 jours 17 heures	2 minutes
● Longue	18/03/2013 12h59	22/02/2014 18h59	341 jours 6 heures	2 heures

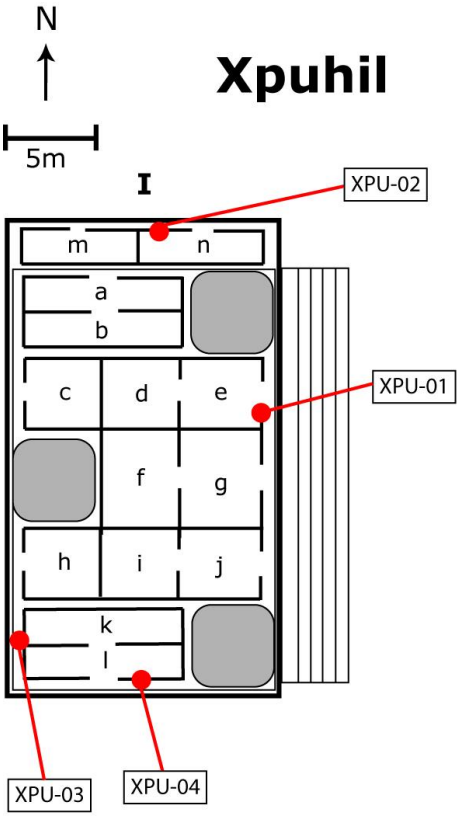
Tab. III-2. Récapitulatif des mesures effectuées pour le monitoring climatique.

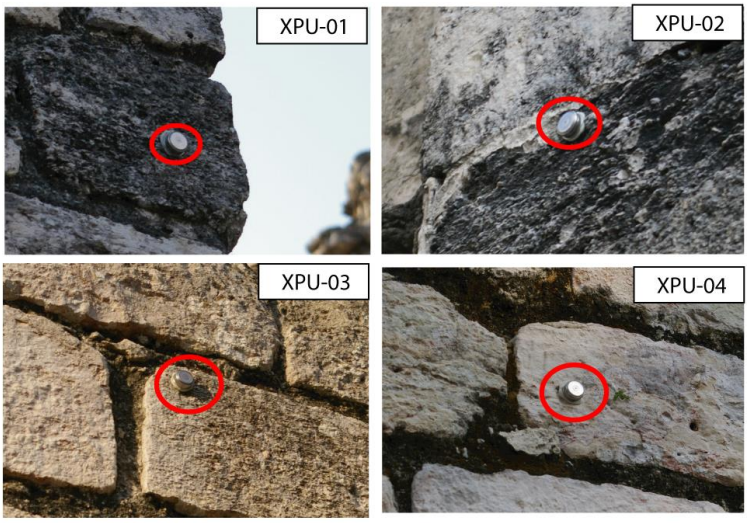
Dans un premier temps, une mesure courte a été réalisée, dans le but de comparer des paramètres climatiques à une échelle très fine, entre deux structures situées dans des contextes différents (sous couvert forestier ou dégagées), ou entre deux parties d'un même parement où une intervention humaine semble avoir une incidence sur la conservation des matériaux de construction. Cette mesure courte s'est effectuée avec un pas de temps de 2 minutes entre chaque enregistrement, et donc une résolution assez fine pour relever d'infimes variations thermiques ou hygrométriques entre les sites

de mesure. Pour comparer les ambiances forestières et dégagées, les capteurs ont été placés sur les façades sud de la structure I de Xpuhil, en contexte dégagé, et de l'unique structure du site appelé Xpuhil II, situé à 200m du précédent, en contexte forestier. En ce qui concerne l'évaluation de l'impact d'une intervention humaine, c'est le mur occidental d'une chambre de la structure V-A de Becán qui a été choisi, lequel montre des états de conservation variables en fonction de la présence d'une voûte remontée partiellement sur la partie supérieure du parement.

Dans un second temps, les capteurs ont été laissés sur les sites archéologiques étudiés pendant un peu moins d'une année complète, afin d'évaluer d'une part la saisonnalité des paramètres climatiques dans un contexte tropical susceptible d'avoir plus de nuances qu'une simple opposition entre saison sèche et saison des pluies, et d'autre part l'impact de l'orientation des structures sur la quantité de chaleur et d'humidité reçues, notamment sur les façades sud, plus ensoleillées, et les façades est, exposées aux vents dominants venus de l'océan Atlantique. D'une durée de 341 jours, avec un enregistrement toutes les deux heures, cette mesure a permis de répondre à ces objectifs, et a également été effectuée sur le mur de la structure V-A de Becán avec succès, afin de disposer pour ce site des deux résolutions de monitoring.

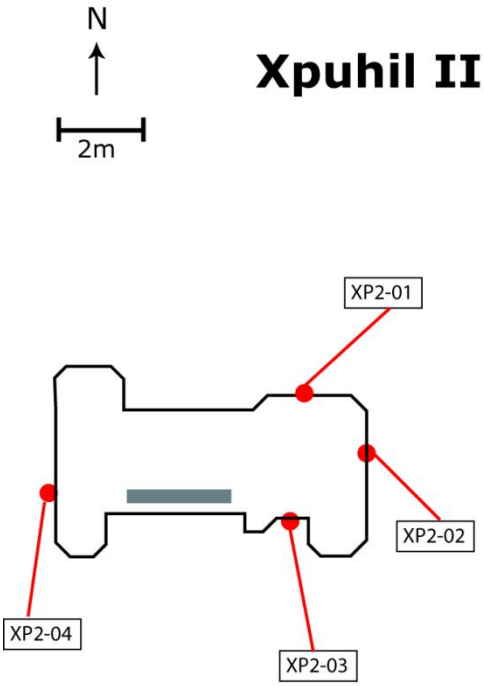
Les capteurs iButton ont été positionnés à Xpuhil (Fig. III-5), Xpuhil II (Fig. III-6) et Becán (Fig. III-7) en suivant le protocole défini précédemment, c'est-à-dire fixés avec de la pâte collante sur les surfaces rocheuses et préalablement configurés avec le logiciel TemplIt4.

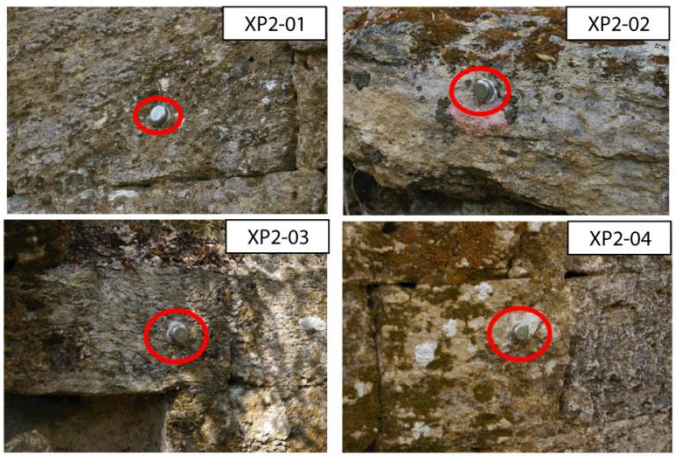




Capteur	Orientation	Distance du sol
XPU-01	Est	2,50m
XPU-02	Nord	2,60m
XPU-03	Ouest	2,05m
XPU-04	Sud	3m

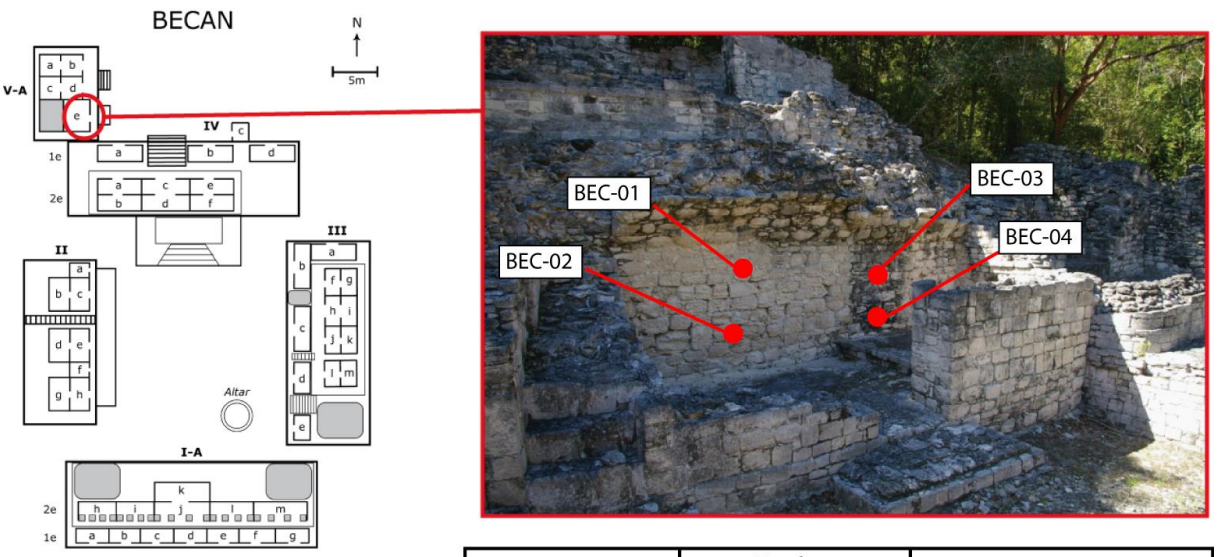
Fig. III-5. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Xpuhil.





Capteur	Orientation	Distance du sol
XP2-01	Nord	1,70m
XP2-02	Ouest	0,50m
XP2-03	Sud	1,20m
XP2-04	Est	1m

Fig. III-6. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Xpuhil II.



Capteur	Partie	Distance du sol
BEC-01	Blanche	1,80m
BEC-02	Blanche	0,67m
BEC-03	Noire	1,42m
BEC-04	Noire	0,39m

Fig. III-7. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Becán.

Les capteurs iButton ont été récupérés le 18/03/2013 pour la mesure courte et lors de la mission de terrain de 2014 pour la mesure longue. Les données ont été extraites grâce au logiciel TemplIt4 pour les traitements et analyses statistiques.

2.2.3. Traitement des données

Pour évaluer la saisonnalité des paramètres climatiques, des analyses statistiques basiques ont été pratiquées sur le jeu de données de la mesure longue. A l'aide du logiciel Microsoft Excel 2010, les valeurs maximales, minimales, moyennes et l'écart-type des températures et des taux d'humidité enregistrés sur la façade sud de la structure I de Xpuhil ont été calculées, et un graphique intégrant des boîtes à moustache mensuelles a été réalisé. Ces résultats ont conduit à l'identification des différentes saisons caractérisées par des paramètres climatiques significativement différents. Enfin, les amplitudes thermiques et hygrométriques journalières ont été calculées pour tous les jours de l'année mesurée, ces dernières étant largement susceptibles de commander l'intervention et l'efficacité des processus érosifs.

En ce qui concerne la comparaison des différentes orientations des structures et des ambiances climatiques forestières et dégagées, le même traitement statistique a été appliqué. Des courbes comparatives et des boîtes à moustache ont été réalisées avec Microsoft Excel 2010, et des tests non-paramétriques ont été effectués sur les jeux de données à l'aide de l'extension XLStats 7.0. Pour les différentes orientations des structures, le test de Friedman et le post-hoc de Nemenyi ont été choisis pour confirmer ou infirmer la différence significative des échantillons. Pour les ambiances forestières et dégagées, ce sont les tests de Wilcoxon et de Mann-Whitney, plus robustes pour la comparaison de deux échantillons, qui ont été utilisés. Enfin, pour les deux comparaisons, un couplage des deux variables (température et humidité) a été réalisé à partir de l'ensemble des données sous forme de nuages de points, et présenté sur des figures de synthèse montrant les valeurs moyennes et les amplitudes thermiques et hygrométriques.

3. Diagnostic de la dynamique érosive

Le diagnostic de la dynamique érosive correspond à la troisième étape de ce travail. Celle-ci consiste, une fois le contrôle chronologique des structures étudiées acquis par la première étape d'anamnèse, et les facteurs de contrôle caractérisés lors de la deuxième étape, à dresser un bilan de la dynamique érosive sur les sites archéologiques retenus. Pour ce faire, la méthodologie est basée sur des observations de terrain qui sont ensuite spatialisées et analysées statistiquement. L'objectif de ces observations est de catégoriser les formes et les intensités de détérioration des matériaux et de colonisation par les agents biologiques afin d'identifier les portions de structure où les processus érosifs sont les plus efficaces, et d'établir d'éventuelles corrélations entre ces derniers et l'état de conservation des parements. Lors de cette étape, plusieurs éléments des structures ont été étudiés, et ce à plusieurs échelles : l'intégralité des parements des sites retenus, les différents corps des tours de la structure 5N2 à Río Bec, les pierres de taille du mur de la structure V-A de Becán, et les éléments constitutifs des panneaux à damiers que l'on retrouve à Becán et Río Bec. Le diagnostic de la dynamique érosive à différentes échelles nous permet ainsi d'avoir une vision globale de l'activité des processus de détérioration dans le secteur archéologique étudié, mais aussi une lecture plus fine de cette activité sur des surfaces rocheuses plus réduites.

3.1. Catégorisation des formes et intensités d'érosion et de colonisation biologique

Le diagnostic de la dynamique érosive se fonde avant tout sur des observations géomorphologiques de terrain, lesquelles visent à identifier les différents processus érosifs à l'œuvre, ainsi que leur intensité. Le contexte bioclimatique tropical dans lequel s'inscrivent les structures étudiées implique également la prise en compte des agents biologiques présents sur les surfaces rocheuses ainsi que leur taux de recouvrement sur ces dernières. Comme précisé précédemment, ces observations ont été réalisées à différentes échelles et selon différentes variables en fonction des éléments analysés (Tab. III-3), mais toujours par le même observateur : l'auteur.

Individus statistiques observés

Variables étudiées	Parements des structures étudiées	Corps des tours de la structure 5N2 de Río Bec	Blocs du mur de la structure V-A de Becán	Blocs des panneaux à damiers (Becán et Río Bec)
État de conservation	●	●	●	
Signatures des processus érosifs	●		●	
Colonisation biologique (agents et taux de recouvrement)	●			●
Intensité de l'érosion chimique et de l'érosion mécanique				●

Tab. III-3. Récapitulatif des variables étudiées en fonction des individus statistiques observés lors du diagnostic de la dynamique érosive.

Pour les parements des structures étudiées, les variables étudiées permettent tout d'abord de dresser un « portrait » de la dynamique érosive sur l'ensemble du secteur, et d'établir des corrélations entre les processus érosifs, identifiés par leur signature sur l'épiderme rocheux, les agents biologiques et leur taux de recouvrement, et l'état général de conservation des différents parements. Sur les corps des tours de la structure 5N2, la hauteur de l'édifice ne permet que l'appréciation visuelle de leur état de conservation, car une identification des signatures érosives ou des agents biologiques nécessiterait l'escalade dangereuse d'une architecture très verticale. En ce qui concerne les blocs du mur de la structure V-A de Becán, l'opposition très nette des deux parties de ce parement en termes de colonisation biologique exclut la prise en compte de cette variable, laquelle donnerait lieu à des covariances extrêmement fortes entre les parties identifiées et les micro-organismes présents. Enfin, les blocs des panneaux à damiers que

l'on retrouve à Becán et Río Bec sont des éléments dont la taille permet l'estimation assez précise de l'intensité de l'érosion chimique et mécanique sur ces blocs, afin d'évaluer le poids des processus des deux origines.

Afin d'étudier les différentes variables, le présent travail s'est appuyé sur la construction d'échelles visuelles de détérioration, une technique d'investigation géomorphologique qui a depuis longtemps été utilisée par les chercheurs travaillant sur l'érosion de la pierre monumentale. Meierding (1993b) a souligné son efficacité dans son travail sur la détérioration des pierres tombales due à la pollution atmosphérique aux États-Unis, à condition qu'un nombre élevé d'individus statistiques soient mesurés. Mottershead (1994) a utilisé cette technique pour distinguer plusieurs intensités d'alvéolisation dans les grès de Weston Super Mare (Royaume-Uni), et plus tard rappelé le caractère traditionnel et expert de l'observation qualitative par l'œil exercé des géomorphologues (Mottershead, 2000). Fitzner *et al.* (2002) ont croisé l'état de détérioration des parements avec les différents processus érosifs dans leur travail sur les monuments historiques du Caire (Egypte), de même que Heinrichs (2008) dans son diagnostic de la détérioration des monuments en pierre taillée à Pétra (Jordanie). Enfin, André *et al.* (2010) ont également utilisé cette technique sur les pétales de lotus des temples d'Angkor (Cambodge).

État de conservation des matériaux de construction

L'état de conservation des matériaux de construction, que ce soit pour les parements des structures étudiées, les corps des tours de la structure 5N2 de Río Bec ou les blocs du mur de la structure V-A de Becán, a été estimé qualitativement et visuellement sur la base des pertes de matière. Quatre niveaux de conservation ont été définis (Fig. III-8), allant de « bon état » pour des matériaux bien conservés, dont les angles sont bien dessinés, qui présentent une surface régulière et peu attaquée par les agents atmosphériques, à « très détérioré » pour les matériaux ayant subi une érosion massive ayant arrondi les angles et laissé des vides entre les pierres taillées, et dont les surfaces sont très irrégulières et présentent des saillies et des rentrants. Les catégories « peu détérioré » et « détérioré » viennent nuancer ces deux extrêmes.

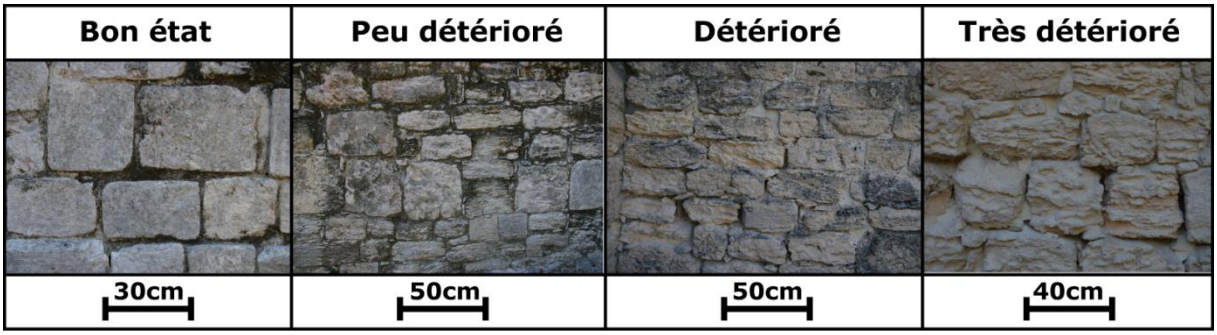


Fig. III-8. Abaque de l'état de conservation des matériaux de construction.

Signatures érosives relatives aux différentes formes de détérioration

Dans le secteur archéologique Río Bec, les principales formes de détérioration ont été répertoriées et une catégorisation a été construite (Fig. III-9), fondée sur la signature érosive des processus. Les matériaux affectés par la dissolution présentent des irrégularités de la surface rocheuse sous forme de « vaguelettes », un arrondissement des angles de la pierre, et des cupules sur les surfaces planes. Le creusement est une forme de désagrégation granulaire avancée impliquant un retrait important de la pierre entre deux parties saillantes. Il se distingue du délitage par son ampleur, ce dernier étant une forme plus superficielle de détérioration préférentielle des lignes de faiblesse des matériaux. Enfin, la signature propre de la desquamation est l'apparition d'écailles d'épaisseur millimétrique se détachant de la surface des matériaux.

L'identification de ces signatures érosives permet, dans une certaine mesure, de supposer l'activité des processus qui y sont rattachés. En effet, la coexistence de plusieurs processus est susceptible de masquer les signatures des uns par la surreprésentation de la signature des autres, les dits processus peuvent ainsi se superposer sur une pierre « palimpseste ». Cependant, la présence de signatures relatives à tel ou tel processus permet de témoigner de son activité au moment de l'observation, même si cette activité n'implique pas l'inactivité d'autres processus. Ainsi, que ce soit pour les parements des structures étudiées ou les blocs du mur de la structure V-A, les signatures érosives ont été relevées par un opérateur logique (0=absence ; 1=présence), permettant l'identification de plusieurs formes de détérioration sur un même individu statistique.

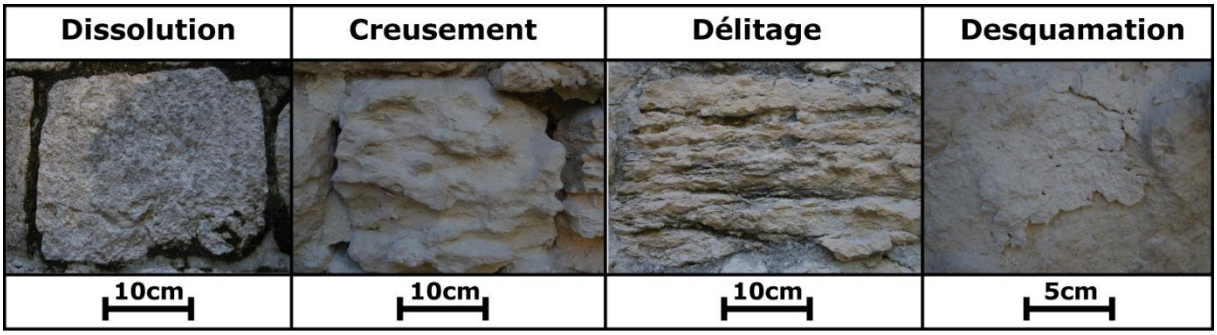


Fig. III-9. Abaque des principales formes de détérioration relevées dans le secteur Río Bec.

Colonisation biologique par les microorganismes

Le contexte bioclimatique tropical dans lequel s'inscrivent les structures archéologiques du secteur Río Bec implique une colonisation biologique importante par un grand nombre de microorganismes. Le rôle potentiel de ces derniers, dont l'équilibre entre détérioration et protection reste à apprécier en fonction des agents biologiques et de leurs caractéristiques, est à prendre en compte dans l'étude de la détérioration de matériaux de construction évoluant dans un tel contexte. Dans le secteur Río Bec, quatre formes de colonisation biologique se retrouvent principalement sur les surfaces rocheuses des sites archéologiques (Fig. III-10).

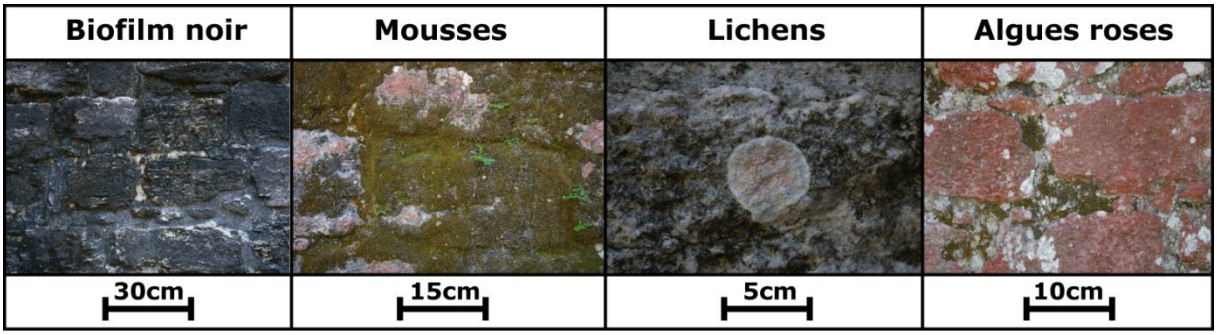


Fig. III-10. Principaux microorganismes colonisateurs dans les sites archéologiques du secteur Río Bec.

Premièrement, des biofilms noirs peuvent recouvrir les surfaces rocheuses ; ces recouvrements sont relativement uniformes, de couleur sombre (grisâtre à noir), de texture rugueuse à spongieuse lorsqu'ils sont humectés. Deuxièmement, on rencontre des mousses de couleur verdâtre à jaunâtre, de texture duveteuse et dont le recouvrement est plutôt préférentiel sur les joints et les interstices entre les blocs. Troisièmement, des groupes isolés de petits lichens, de 1 à 5 cm par individu, de couleur blanchâtre à rosâtre et de texture crayeuse ou granuleuse se retrouvent également dans

le secteur. Enfin, des algues roses se développent de manière extensive sur les matériaux de construction, de couleur rosâtre pouvant tirer sur l'orange, de texture lisse et brillante.

La présence de ces microorganismes a été relevée sur les parements des structures étudiées et sur blocs constituant les panneaux à damiers de Becán et Río Bec. La coexistence des différents recouvrements est ici aussi tout à fait possible et avérée, et il a été choisi de les caractériser plus finement en relevant par la même occasion leur taux de recouvrement sur l'élément mesuré, sur une échelle de quatre niveaux : de 1 à 25%, de 25 à 50 %, de 50 à 75% et de 75 à 100% de recouvrement sur l'élément en question.

Intensité de l'érosion chimique et de l'érosion mécanique

Les intensités d'érosion chimique et mécanique ont été évaluées et comparées sur les blocs constituant les panneaux à damiers retrouvés à Becán et Río Bec. Deux échelles visuelles de détérioration, l'une chimique, l'autre mécanique, ont été construites (Fig. III-11) largement inspirées par celles qui ont été construites par André *et al.* (2010) pour étudier les pétales de lotus sur les sites archéologiques khmers du Cambodge.

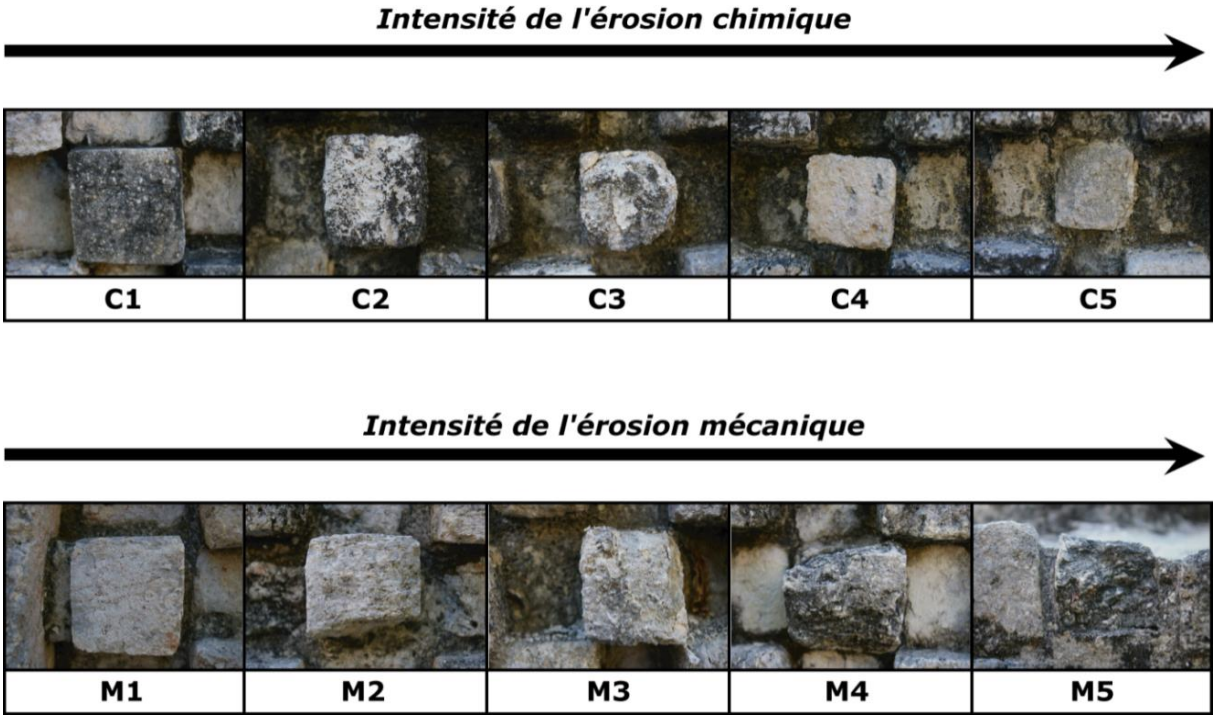


Fig. III-11. Échelles visuelles de détérioration chimique et mécanique construites pour l'étude des blocs constituant les panneaux à damiers de Becán et Río Bec.

L'intensité de l'érosion chimique a été estimée sur la base de l'arrondissement des angles des blocs, de l'apparition de cupules à leur surface et à la texture de plus en plus crayeuse des matériaux observés. L'intensité d'érosion mécanique a elle été estimée sur la base de l'apparition de fissures à la surface des matériaux et sur les pertes de matières par détachement et cassures. Les deux échelles ainsi construites comportent cinq niveaux d'intensité de C1 à C5 pour l'érosion chimique, de M1 à M5 pour l'érosion mécanique.

Les données récoltées sur le terrain lors du diagnostic de la dynamique érosive sont extrêmement variées. Les canevas obtenus sont détaillés sur la figure III-12 en fonction des jeux de données et soulignent leur diversité en indiquant les types de variables étudiées pour chacun d'entre eux.

Parements des structures étudiées

Code	Structure	Chambre	Parement	Niveaudet	Dissolution	Delitage	Desquamation	Creusement	Biofilm noir	Algues roses	Lichens	Mousses
5AAN	V-A	A	Nord	2	1	1	1	0	3	0	1	1
5AAE	V-A	A	Est	2	1	0	0	0	4	0	1	1
5AAS	V-A	A	Sud	2	1	0	0	0	2	0	1	1
5AAO	V-A	A	Ouest	3	0	1	1	0	0	0	0	0
5ABN	V-A	B	Nord	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Pierres du mur de la structure V-A de Becán

Code	Niveaudet	Dissolution	Desquamation	Creusement	Délitage
1A	1	0	1	0	0
1B	3	0	0	1	1
1C	3	0	1	1	0
1D	3	0	1	1	0
1E	4	0	0	1	0
1F	2	0	1	0	0

Blocs des panneaux à damiers de Becán et Río Bec

Code	C	M	Biofilm noir	Algues roses	Lichens
1A	NA	4	0	0	0
1C	1	1	0	0	0
1E	2	2	0	0	0
1G	2	3	0	0	0
1I	1	2	0	0	0

Variables qualitatives

Variables qualitatives ordinales

Variables qualitatives logiques

Code d'identification des éléments mesurés

Fig. III-12. Différents canevas des jeux de données obtenus lors du diagnostic de la dynamique érosive et mention du type de variables étudiées.

Un code d'identification a été attribué à tous les éléments mesurés lors du diagnostic de la dynamique érosive afin de pouvoir les identifier en tant qu'individus statistique. Pour les parements des structures étudiées, ce code est composé du numéro de la structure, d'une lettre correspondant à la chambre dans laquelle se trouve ce parement et d'une autre lettre correspondant à sa position cardinale. Pour les pierres du

mur de la structure V-A et pour les panneaux à damiers, le code est composé d'un chiffre pour la rangée et d'une lettre pour la colonne dans lesquelles se situent les éléments mesurés. Ensuite, les jeux de données sont composés de variables qualitatives relatives à l'élément mesuré (structure, chambre, orientation), mais aussi de variables qualitatives ordinales, c'est-à-dire une mesure sur une échelle divisée en classe (état de conservation, colonisation biologique incluant le taux de recouvrement), et de variables qualitatives logiques, dont la modalité est un indicateur logique présence/absence (« 1 » : présence, « 0 » : absence).

3.2. Spatialisation des résultats

Les données obtenues lors du diagnostic de la dynamique érosive ont dans un premier temps été spatialisées afin de pouvoir cartographier les différentes variables mesurées. Cette spatialisation des résultats a été réalisée à l'aide du logiciel de géomatique MapInfo Professional 10.0, dans lequel les différents éléments mesurés ont été digitalisés en superposant une couche dessin à un plan du site ou à une orthophotographie du mur de la structure V-A de Becán ou des panneaux à damiers. Une fois ces éléments digitalisés sous la forme de polygones, la table attributaire a été modifiée pour obtenir la même structure que le jeu de données disponible sous format Excel. Ensuite, les polygones ont été renseignés par un code d'identification rigoureusement identique à celui du jeu de données Excel, ce qui a permis d'effectuer une jointure entre les deux fichiers et de mettre à jour les différentes colonnes avec les modalités des variables mesurées.

La seconde étape de la spatialisation des résultats du diagnostic de la dynamique érosive est la création de cartes thématiques sur la base des données incorporées par jointure dans le système d'information géographique. Pour ce faire, il a suffi de sélectionner la variable à cartographier dans l'outil de création de carte thématique, de choisir les plages de couleurs et de travailler la légende. Les cartes thématiques ainsi créées représentent les différentes modalités prises par les éléments étudiés pour chaque variable.

3.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques pratiquées sur le jeu de données issu du diagnostic de la dynamique érosive répondent à deux principaux objectifs : caractériser le poids et la répartition des différentes variables étudiées en fonction des sites et des structures étudiées, et identifier de potentielles corrélations et coévolutions entre ces différentes variables.

Afin de répondre au premier objectif, des analyses statistiques basiques (histogrammes et graphiques en secteurs) ont été réalisées sur les données concernant les parements des structures étudiées, le mur de la structure V-A de Becán, les corps des tours de Río Bec et les panneaux à damiers. Ces statistiques univariées ont été pratiquées avec le logiciel Microsoft Excel 2010 sur chacune des variables étudiées afin de comparer les sites archéologiques, les différentes parties du mur, corps des tours et panneaux à damiers entre eux. Pour le deuxième objectif, il a été nécessaire de réaliser des analyses statistiques multivariées, notamment en ce qui concerne les parements des structures étudiées, dont le jeu de données obtenu comporte de nombreuses variables de types différents. Le tableau III-4 récapitule les différentes analyses statistiques pratiquées sur les différents éléments étudiés, caractérisés chacun par les variables énoncées précédemment.

Individus statistiques observés

Variables étudiées	Parements des structures étudiées	Corps des tours de la structure 5N2 de Río Bec	Blocs du mur de la structure V-A de Becán	Blocs des panneaux à damiers (Becán et Río Bec)
État de conservation	● □	●	● ■	
Signatures des processus érosifs	● □		● ■	
Colonisation biologique (agents et taux de recouvrement)	● □			■
Intensité de l'érosion chimique et de l'érosion mécanique				● ■

● Analyses statistiques univariées (histogrammes, diagrammes en secteurs)

■ Analyses statistiques multivariées (Analyses en Composantes Principales, "ACP")

□ Analyses statistiques multivariées (Analyse des Correspondances Multiples, "ACM")

Tab. III-4. Analyses statistiques pratiquées sur les différents éléments observés en fonction des variables étudiées.

Des analyses multivariées différentes ont été pratiquées en fonction des individus observés, ces derniers incluant des variables de différents types. Pour l'étude des parements du secteur, la présence de variables qualitatives ordinales, logiques, et des variables qualitatives « classiques » telles que l'orientation du parement, nous a conduit à choisir l'analyse des correspondances multiples (ACM) pour tenter d'identifier d'éventuelles corrélations entre les nombreuses modalités du jeu de données. En effet, cette analyse est la plus adaptée pour un jeu de données de ce type, combinant un grand nombre de variables de types différents (Husson *et al.,* 2016). De plus, en raison du nombre de variables mesurées, l'ACM permet la représentation de chacune d'entre elles sur un espace factoriel répété autant de fois que le nombre de variables, ce qui permet une lisibilité accrue de ce jeu de données.

De même, il est important de préciser que, en raison d'une part d'une forte covariance avec d'autres variables et de leur nature subjective et « experte », les variables « état de conservation » (évalué visuellement par l'opérateur) et « classement anamnèse » (correspondant au classement de la structure en fonction de sa trajectoire d'intervention définie lors de l'étape d'anamnèse) ont été spécifiées en tant que variables supplémentaires – aussi dites illustratives – lors de l'ACM. Ces dernières ne participent donc pas à la construction de l'axe factoriel sur lequel se visualisent les modalités, et sont bien moins susceptibles d'induire en erreur lors de l'interprétation. En ce qui concerne les analyses effectuées sur les panneaux à damiers et les blocs du mur de Becán, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée, les variables qualitatives logiques et ordinales pouvant, lorsque le jeu de données est uniquement composé de variables de ce type, être analysées par cette méthode, d'ordinaire plus robuste pour les variables quantitatives. Le faible nombre de variables et de modalités dans ces deux jeux de données permet également leur représentation sur un espace factoriel simple, construit par l'ACP, sans nuire à la lisibilité des résultats.

L'analyse des correspondances multiples a été effectuée avec le logiciel libre R en utilisant le package FactoMineR (Husson *et al.,* 2007) et le plugin Rcommander. Les analyses en composantes principales ont été réalisées avec l'extension XLStats 7.0 pour Microsoft Excel 2010.

4. Quantification de l'érosion

La quantification de l'érosion correspond à l'étape finale de ce travail. En lien avec les précédents résultats, elle vise, par des méthodes quantitatives, l'obtention de données chiffrées correspondant au retrait des matériaux par rapport à une surface de référence pouvant être estimée grâce aux résultats de l'anamnèse des structures étudiées. Les éléments ou portions d'édifice qui ont fait l'objet de quantification ont également été sélectionnés à la lumière des résultats du diagnostic de la dynamique érosive, et leur interprétation est fortement liée à l'évaluation de l'impact des facteurs de contrôle.

4.1. Photogrammétrie multi-images

La photogrammétrie est une « technique qui permet de définir précisément les formes, les dimensions et la position spatiale d'un objet en utilisant des mesures faites sur plusieurs photographies de cet objet. » (Bonneval, 1972). On distingue généralement deux types de photogrammétrie, la photogrammétrie multi-images et la stéréophotogrammétrie. La photogrammétrie multi-images permet la restitution par l'utilisation de plusieurs points de vue différents qui peuvent être fortement convergents (Vautier *et al.,* 2008). Les résultats des travaux de comparaison entre lasergrammétrie et photogrammétrie pour la mesure d'érosion de pierres de façade menés par Vautier et Voldoire (2011) ont montré que la méthode se révélait suffisamment fiable et précise pour autoriser son utilisation dans un objectif de quantification de l'érosion de la pierre monumentale. Il s'agit d'une méthode quantitative, qui a été appliquée aux gneiss médiévaux de l'abbatiale Saint-Sébastien de Manglieu dans le Puy-de-Dôme (André *et al.*, 2014), mais aussi en archéologie, pour la reconstitution infographique de fouilles archéologiques (Doneus *et al.,* 2011 ; Verhoeven, 2011).

Si cette méthode est valide pour des érosions assez prononcées, son utilisation dans des contextes où les taux de retrait sont de l'ordre du millimètre se heurte à certaines limites. En effet, s'agissant d'une mesure indirecte, elle ne permet donc pas de relever l'information en temps réel, ce qui induit un cumul d'erreurs, d'abord lors de l'acquisition des données sur le terrain, puis pendant la phase de post-traitement (Vautier *et al.*, 2008). En outre, la limite principale des méthodes de quantification de

l'érosion de la pierre monumentale est l'acquisition d'une surface de référence fiable et pertinente afin de calculer un taux de retrait exploitable.

4.2. Acquisition des données sur le terrain

L'application de cette méthode est séduisante car elle est peu coûteuse et facile à mettre en œuvre. En effet un seul opérateur suffit et le matériel se limite à un appareil photographique autofocus numérique (ici un Pentax K100D), de gommettes servant de cibles à disposer aux extrémités de la zone étudiée et d'un mètre de chantier servant à mesurer les distances entre les cibles afin de pouvoir insérer un référentiel métrique local lors du post-traitement (Fig. III-13).

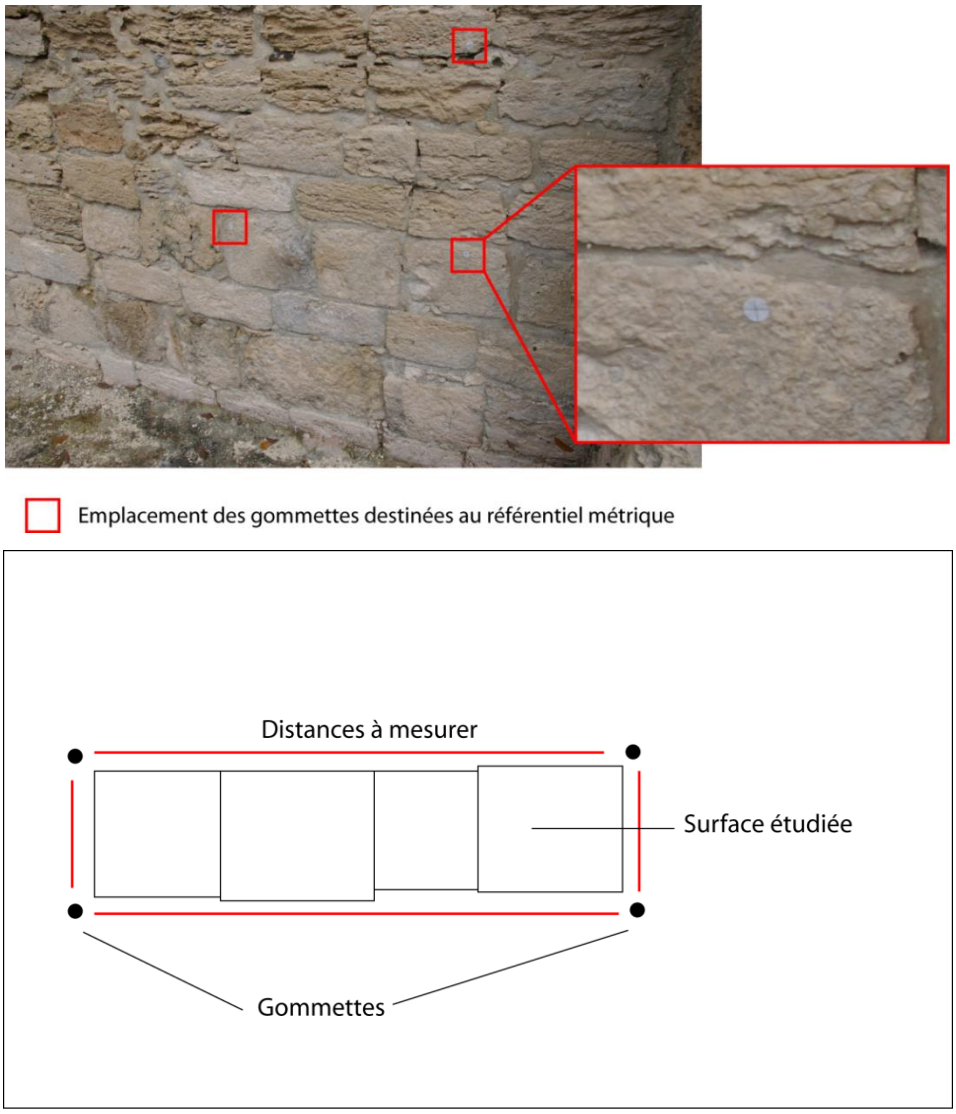


Fig. III-13. Mise en place des gommettes permettant l'intégration d'une distance de référence pour le post-traitement.

On effectue ensuite une couverture photographique de l'objet sous des angles différents, avec un taux de recouvrement maximum (Fig. III-14). Une trentaine de clichés sont généralement suffisants pour modéliser correctement une surface de quelques mètres carrés.

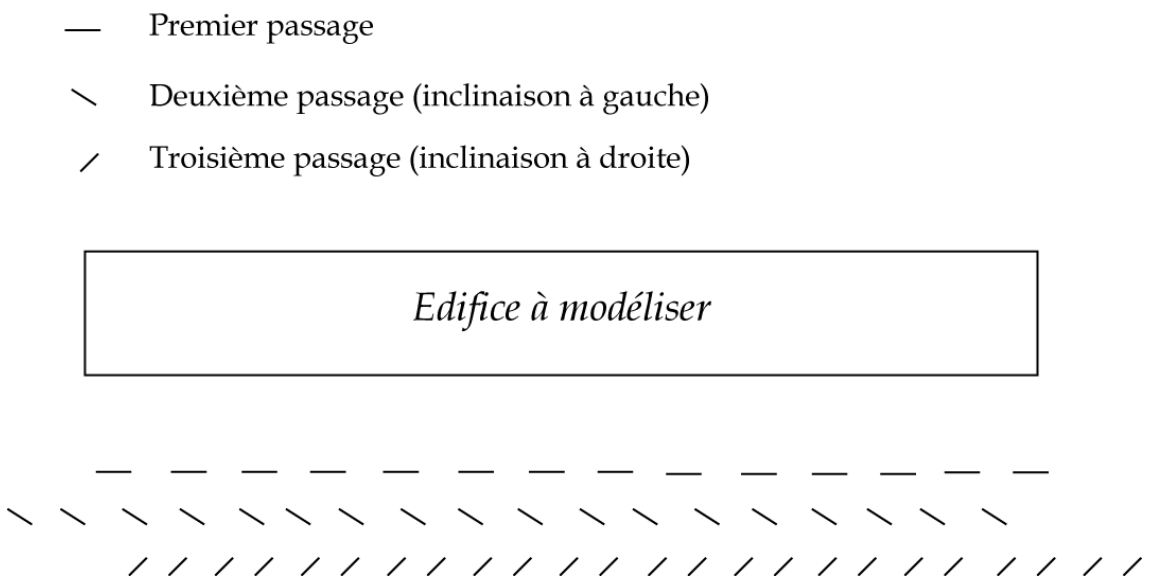


Fig. III-14. Protocole de prises de vue photographiques destinées à la modélisation d'une section d'édifice.

Les photographies ainsi obtenues peuvent ensuite être intégrées au logiciel Agisoft Photoscan afin de construire des modèles numériques pouvant ensuite être intégrés à un SIG à des fins de quantification.

4.3. Post-traitement des données

Le post-traitement des données se déroule en deux étapes : l'étape de modélisation, réalisée sur le logiciel Agisoft Photoscan, et l'étape de quantification, réalisée grâce au logiciel ArcGis.

4.3.1. Étape de modélisation

L'étape de modélisation consiste à intégrer les photos de la zone correspondant à la fenêtre photogrammétrique dans le logiciel Agisoft Photoscan (version 0.8.3 beta build 1224 64bits, les versions plus récentes étant plus complexes et moins adaptées à des modélisations de surfaces verticales en coordonnées géographiques locales). Une fois les photos ajoutées à un projet, la première procédure est l'alignement de ces dernières selon les paramètres qui apparaissent sur la figure III-15. Cette procédure va permettre au

logiciel de reconnaître les pixels similaires entre les différentes photos intégrées et de calculer des distances relatives pour chacun d'entre eux. La finalité de la procédure est l'obtention d'un nuage de points en trois dimensions.

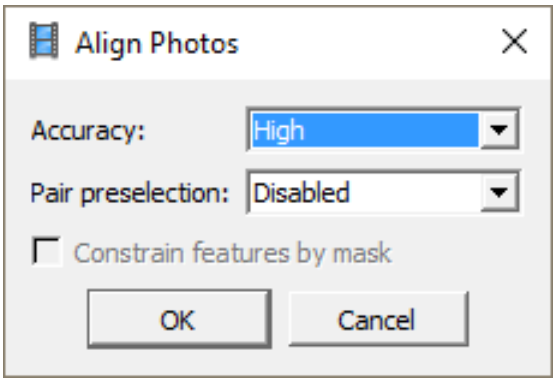


Fig. III-15. Paramètres choisis pour l'alignement des photographies de la surface étudiée.

Une fois les photos alignées, la seconde procédure consiste à construire le modèle en trois dimensions sur la base du nuage de points obtenu par l'alignement des photographies. Le modèle est généré par extrapolation et les différentes facettes sont construites à partir des points du nuage. Les paramètres retenus pour cette procédure sont détaillés sur la figure III-16.

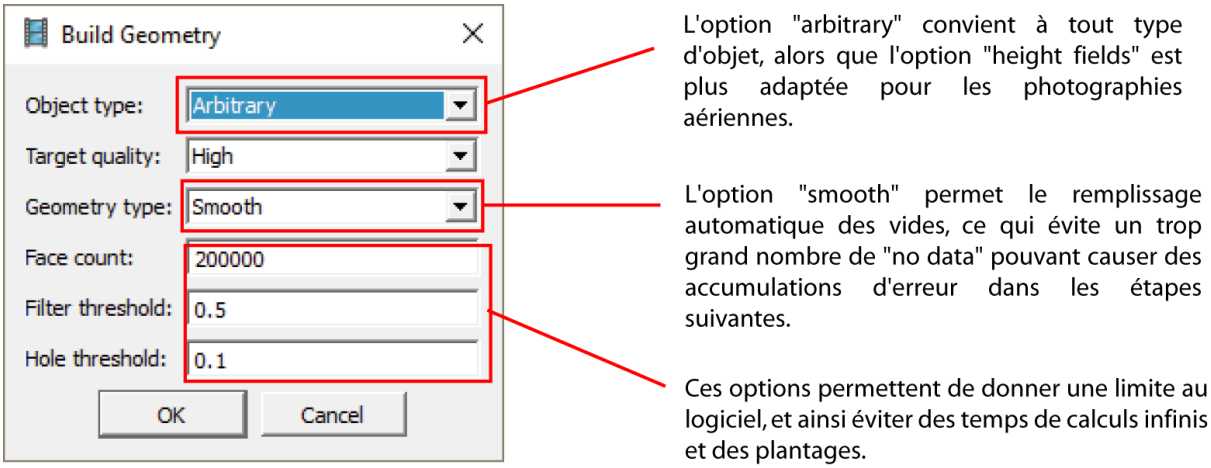


Fig. III-16. Paramètres retenus pour la construction de la géométrie (seconde procédure de l'étape de modélisation).

Les modèles obtenus doivent ensuite être corrigés. En effet, des points parasites (poussières, feuilles d'arbres ou bouts de ciel) peuvent avoir été intégrés au nuage de points lors de l'alignement des photos et des facettes des modèles ont pu être extrapolées à partir de ces points, conduisant à des aberrations. Une correction des modèles s'impose

donc en supprimant manuellement ces facettes afin d'obtenir des surfaces les plus rectilignes possibles et des rendus plus fidèles à la réalité des surfaces étudiées. Une fois cette correction faite, la troisième procédure, plus rapide et plus simple, consiste à appliquer sur le modèle une texture créée par le logiciel à partir des prises de vues intégrées au début du travail de modélisation. Cette procédure a été réalisée avec les paramètres représentés sur la figure III-17.

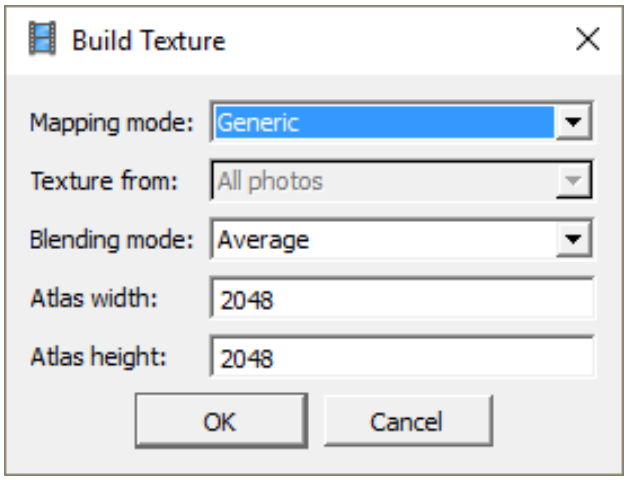


Fig. III-17. Paramètres retenus pour l'application de textures sur les modèles.

L'application de texture permet l'exportation d'orthophotos réalistes de haute résolution afin de travailler sur les surfaces étudiées en dessin assisté par ordinateur, mais aussi l'insertion des points de contrôle matérialisés par des gommettes appliquées physiquement sur la surface étudiée lors de la collecte des données sur le terrain. Ces points de contrôle sont intégrés sur le modèle, une distance de référence est spécifiée au logiciel en coordonnées locales, puis les points de contrôle sont vérifiés et éventuellement corrigés sur l'ensemble des photographies ayant servi à la modélisation. Le modèle ainsi référencé est prêt à être exporté pour la seconde étape de quantification. L'exportation de modèle se réalise par l'action « Export DEM » du logiciel Agisoft Photoscan, en format « GeoTiFF elevation data *.tif ».

4.3.2. Étape de quantification

L'étape de quantification est réalisée sur le logiciel ArcGis 10. Elle consiste à utiliser le modèle numérique (MNT) créé sur Agisoft Photoscan à partir des photographies de la fenêtre photogrammétrique étudiée pour effectuer des calculs de retrait des points du modèle par rapport à une surface de référence extrapolée sur

ArcGis 10. Le protocole utilisé, qui comporte de nombreuses étapes, est synthétisé sur la figure III-18.

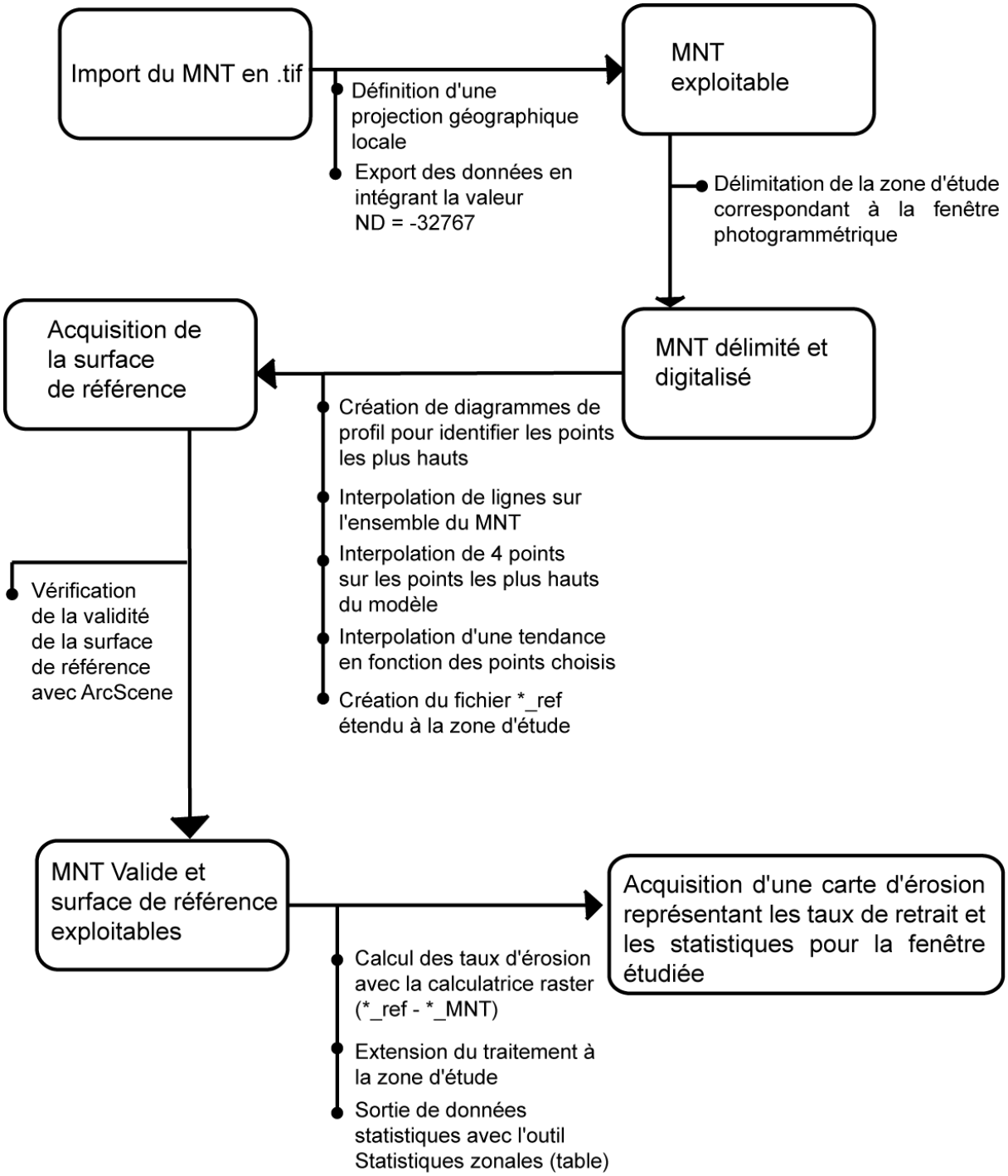


Fig. III-18. Protocole de l'étape de quantification réalisée sur le logiciel ArcGis.

La validité de la surface de référence étant d'une importance cruciale, celle-ci est systématiquement vérifiée par l'extension ArcScene, permettant la visualisation en trois dimensions des modèles traités. A ce stade, il est indispensable de vérifier que la surface de référence extrapolée ne recoupe pas le modèle numérique et qu'elle soit le plus possible parallèle à ce dernier, afin que les données obtenues par la soustraction des points du modèle à cette surface soient valides et comparables entre elles pour chaque fenêtre photogrammétrique. La figure III-19 montre un exemple de cette vérification effectuée sur ArcScene.

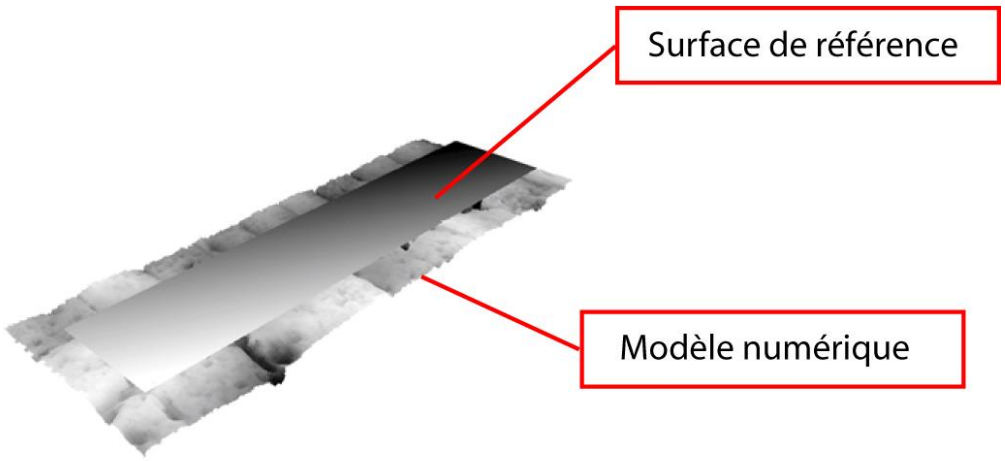


Fig. III-19. Exemple de vérification de surface de référence sur ArcScene.

Au final, les données obtenues permettront de déterminer les taux de retrait maximum calculés sur une fenêtre photogrammétrique donnée. Les fenêtres étant pour la plupart de tailles différentes, la comparaison des taux de retrait moyens entre ces dernières est sujette à caution, au même titre que les taux de retraits minimum qui dépendent largement de la distance entre le modèle et la surface de référence extrapolée. Des données supplémentaires sur les résolutions des modèles obtenus ont donc été intégrées au travail. Les localisations et caractéristiques des fenêtres photogrammétriques ouvertes sur les différents sites sont incorporées au chapitre VII (p. 245), consacré aux résultats de l'étape de quantification de l'érosion.

Conclusion du chapitre 3

Au cours de ce travail, nous avons construit une méthodologie qui intègre des techniques innovantes telles que la photogrammétrie multi-images, mais également fondée sur des méthodes classiques, utilisées et validées par les géomorphologues travaillant sur les problématiques d'érosion de la pierre monumentales.

En effet, ces derniers ont insisté sur la validité de l'observation qualitative *in situ,* avec notamment l'association des formes observées aux processus érosifs responsables, lesquels sont à leur tour associés à des paramètres bioclimatiques, mais également la catégorisation de l'intensité de l'érosion. Les jeux de données qui ont été ensuite analysés par différentes méthodes statistiques ont ainsi donné des résultats relativement hétérogènes en termes de forme, tout en gardant la même volonté de questionnement.

Par ailleurs, nous avons également cherché à caractériser le plus finement possible les matériaux qu'il nous a été donné d'étudier, ainsi que les paramètres climatiques dans lesquels ils ont évolué. Pour ce faire, nous avons fait appel à des techniques de monitoring climatique et d'analyses pétrographiques classiques (géochimie, observation en lames minces ou par microscopie électronique), mais nous avons également dû composer avec les aspects légaux quant à la collecte d'échantillons ou de données climatiques par capteurs fixés sur les structures. Enfin, les recherches en archives ont constitué une somme importante de travail qui a été effectuée sur le long terme, par des allers-retours constants entre le terrain et les centres de documentation.

Au total, la méthodologie construite est variée et les différentes techniques qui y ont été intégrées feront l'objet, dans la discussion des résultats, d'un retour sur expérience. En effet, si certaines méthodes ont déjà fait leurs preuves, d'autres méritent ce retour afin d'apporter des perspectives d'amélioration et de souligner certaines limites.

PARTIE 2

Résultats

Chapitre IV
Anamnèse des structures étudiées

"In medicine, the first stage in any diagnosis is the taking of a patient's clinical history. This provides the opportunity to clarify symptoms and to explore any underlying causes or contributory factors that may help to pin down an illness."

B.J Smith & R. Prikryl, 2007.

Le premier ensemble de résultats présenté ici concerne l'anamnèse des structures étudiées, préalable indispensable à toute tentative d'étude de la dynamique érosive et de reconstitution du tempo de la détérioration dans une approche quantitative et diachronique. En effet, ces dernières impliquent une connaissance fine et approfondie des interventions pratiquées sur le bâti et l'acquisition d'un contrôle chronologique le plus complet possible. Il s'agit donc, toujours en se basant sur l'analogie avec la pratique médicale (Fitzner, 2004 ; Smith et Prikryl, 2007), de réaliser l'anamnèse, c'est-à-dire de reconstituer l'historique des monuments, et notamment des principales phases de leur histoire architecturale et environnementale récente. Cette étape permet en effet de confronter les phénomènes d'érosion observés à des événements concrets, relatifs ou non au forçage anthropique que nous cherchons à caractériser et à quantifier.

Nous rendrons donc compte, site par site, de l'ensemble des informations recueillies concernant les structures archéologiques sélectionnées, de leur date de découverte jusqu'aux dernières opérations de restauration recensées. Les sites de Becán et Xpuhil, relativement similaires en termes de chronologie récente de mise en valeur, de disponibilité et d'homogénéité des sources bibliographiques, seront présentés dans un premier temps. Nous nous intéresserons ensuite au site éponyme de Río Bec, dont les principales fouilles archéologiques et interventions se sont déroulées dans les années 2000, et sur lequel nous avons pu disposer de rapports très détaillés nous offrant une échelle d'anamnèse beaucoup plus fine. Enfin, nous présenterons de manière synthétique l'ensemble des interventions mentionnées dans les rapports ou constatées sur le terrain,

ce qui aboutira à une identification des différentes trajectoires d'intervention et à la classification des structures étudiées dans ce cadre d'analyse.

1. Les sites archéologiques de Becán et Xpuhil

Au début du XXe siècle, un nouvel engouement apparaît autour des sites archéologiques de la civilisation maya. En 1913, Sylanus Morley (1883-1948) propose à la *Carnegie Institution of Washington* un plan de recherche archéologique dont il est promu directeur : le *Maya Research Program*. C'est ainsi qu'entre 1913 et 1957 l'institution finance de multiples expéditions de reconnaissance, fouilles archéologiques et restauration au Mexique et en Amérique centrale. Le secteur Río Bec n'est alors pas totalement inconnu des mayanistes, puisqu'il a été parcouru par Theobert Mahler à la fin du XIXe siècle, et par Maurice de Périgny en 1908 (Taladoire, 1995), ce dernier définissant les bases du style architectonique Río Bec.

Dans les années trente, la troisième expédition de la *Carnegie* dirigée par Karl Ruppert et John Denison parcourt les territoires du Campeche, du Quintana Roo et du Petén avec à la clé les premières découvertes et les observations initiales des sites du secteur Río Bec, lesquelles seront consignées dans la publication 543 de la *Carnegie* : *Archaeological reconnaissance in Campeche, Quintana Roo and Peten* (Ruppert et Denison, 1943).

1.1. Becán

Le site de Becán a connu une trajectoire d'occupation extrêmement longue, de 900 av. J.-C. jusqu'au début du XIIIe siècle si l'on se réfère à la séquence céramique établie par Ball (1973). Mais en dehors de l'expédition conduite en 1934 par Ruppert et Denison, par ailleurs essentiellement descriptive, aucune fouille ou opération d'envergure n'est conduite sur ce site avant les années soixante-dix. Le peuplement de la zone est en effet assez récent, et avant l'achèvement de la route 186 en 1972, le secteur n'est parcouru que par des *chicleros* venant d'Hopelchén au nord-ouest jusqu'à des camps aux alentours de Xpuhil pour extraire la gomme des sapotilliers. La région est donc très isolée avant les années 1970, ce qui a d'ailleurs rendu difficiles les pérégrinations de l'expédition de la *Carnegie* ; les récits de Ruppert et Denison (1943) mentionnent en effet l'absence de route, les difficultés d'approvisionnement, et décrivent une zone relativement sauvage et inhabitée.

1.1.1. Découverte et observations initiales

La publication 543 de la *Carnegie* (Ruppert et Denison, 1943) est ainsi la seule source publiée qui décrit précisément les ruines de Becán à leur redécouverte. Ces dernières sont rapportées pour la première fois à l'institution le 11 janvier 1934, et la troisième expédition arrive sur place le 20 février pour y rester jusqu'au 5 mars. L'intérêt pour le site est avant tout motivé par le fossé défensif qui entoure les ruines, structure relativement unique au sein du monde maya, et ce sont d'ailleurs ces explorateurs américains qui nommeront le site par un mot maya « Becán », signifiant « canyon formé par l'eau ». La cité est décrite comme étant organisée de manière assez compacte bien qu'irrégulière, avec des structures orientées avec soin vers les points cardinaux. Trois principaux groupes sont identifiés, relativement similaires à l'organisation qu'adopteront les futurs archéologues (Fig. IV-1).

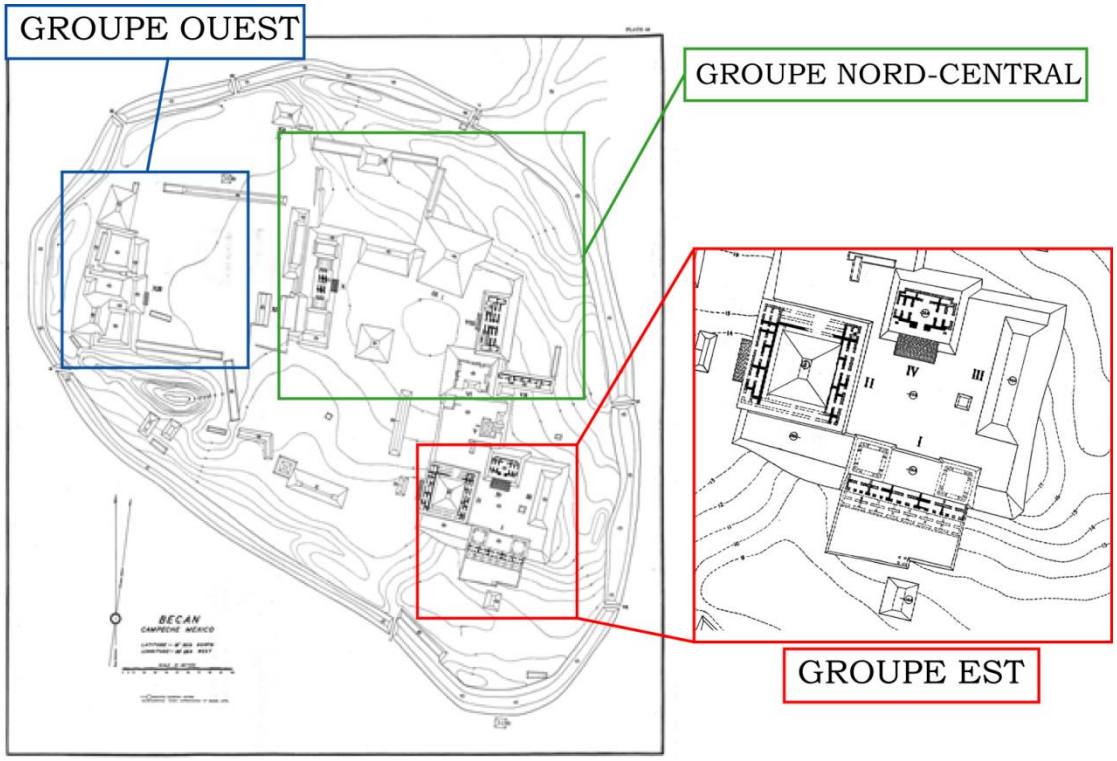


Fig. IV-1. Carte de Becán dressée par la *Carnegie Institution*, modifiée pour localiser les groupes identifiés lors de la redécouverte du site (Ruppert et Denison, 1943).

Notre travail ne concernant que le groupe de structures regroupées à l'est, nous ne détaillerons ici que les résultats d'anamnèse relatifs à ce secteur du site. Ce dernier est décrit comme un ensemble de huit ou neuf structures accompagnées de plusieurs monticules. Les structures I à IV, concernées par notre étude, reposent sur une grande terrasse qui s'élève à 4-7 m au-dessus du sol.

Sur la structure I, qui correspond à la structure I-A dans la nomenclature actuelle, les deux niveaux comportant deux rangées de chambres parallèles peuvent être distingués en 1943, de même que les deux maçonneries massives qui surplombent le niveau inférieur, correspondant à deux tours jumelles. L'agencement général est caché par les débris, mais les explorateurs distinguent 7 chambres de 6 m de largeur (il y a en effet 7 chambres au premier niveau, mais seulement 5 au deuxième, qui font à peu près cette largeur). Au niveau inférieur, les murs arrière sont retrouvés intacts, avec un module rassemblant 6 rangées de blocs avant le contact avec la voûte, qui forme un angle de 55° avec le parement. Au niveau supérieur, à aucun endroit la façade ne s'élève à plus d'un mètre de haut. En ce qui concerne les deux maçonneries massives qui surplombent la structure, la tour ouest est en meilleur état de conservation. Bien que la plupart de sa façade soit effondrée, on remarque l'arrondi des angles typique des systèmes de tours jumelles du secteur Río Bec.

La structure II est en piteux état, avec seulement quelques portions de murs tenant debout. Les maçonneries intérieures restantes présentent un module large et sont très érodées. Aucune voûte n'est retrouvée intacte. On distingue néanmoins les deux rangées parallèles de chambres autour des trois côtés de la structure. Malgré l'absence d'escaliers, les explorateurs relèvent un monticule de débris au sommet de la structure et émettent l'hypothèse d'un temple la surplombant. Aucune mention, dans les descriptions de la Carnegie, des panneaux à damiers sur la façade est du bâtiment.

La structure III est brièvement mentionnée comme un monticule de 52 m de longueur pour 4,50 m de hauteur, avec à son extrémité sud une plateforme de 6 m de côté et 1 m de hauteur. Au nord du groupe est se trouve la structure IV, une pyramide de 34 m de côté, surmontée d'un petit édifice. Les portions intactes présentent des traces de stuc, mais l'ensemble est couvert de débris et difficilement interprétable. Sur la partie nord, cependant, on distingue les deux niveaux de chambres, sans plus de descriptions. La façade ouest de l'édifice apparaît alors comme la mieux préservée. En ce qui concerne la structure V, qui sera nommée plus tard V-A, elle est brièvement qualifiée de monticule irrégulier.

L'attention portée au rapport de Ruppert et Denison, si elle ne nous a pas fourni d'éléments déterminants quant à l'anamnèse des structures de Becán, nous a permis d'entrevoir l'aspect initial du site avant toute opération de restauration. De plus, nous

pouvons dorénavant affirmer, pour l'essentiel des structures, que l'exposition des parements et façades extérieures aux agents bioclimatiques est, à de rares exceptions, contemporaine des dégagements opérés dans les années soixante-dix par la *Tulane University*, et dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix sous l'égide de l'INAH.

1.1.2. Dégagement des structures et consolidations

C'est lors des saisons 1970 et 1971 du projet commun entre la *Tulane University* et la *National Geographic Society* que commencent véritablement les premières fouilles archéologiques d'envergure sur le site de Becán. Dirigées par David F. Potter, spécialiste de l'architecture maya du centre de la péninsule (Potter, 1973), ces opérations se concentrent sur le dégagement partiel de la façade nord de la structure IV, poursuivi et accompagné de consolidation en 1973 (Potter, 1974). L'intérêt pour le secteur Río Bec ne faiblit pas et, la même année, Prentice M. Thomas Jr. effectue des sondages stratigraphiques et quelques légers dégagements de végétation en vue d'établir une chronologie de l'implantation des anciens Mayas dans la région, notamment à Becán (Thomas, 1973). Ball établit également une séquence céramique qui devient une référence pour la chronologie du site (Ball, 1973). L'année suivante, Lewis C. Messenger entreprend le dégagement et la consolidation de la structure V-A (Messenger, 1975), malheureusement réalisés sans une compréhension totale de ses aspects architecturaux, selon Bueno *et al.* (1992). L'aspect actuel de l'entrée du site, présentant la structure V-A et la façade nord de la structure IV se dessine peu à peu.

Au cours de la décennie suivante, c'est le groupe est, aussi appelé *Plaza Oriente*, qui fait l'objet d'opérations de dégagement et de consolidation intensives. C'est désormais l'INAH et les archéologues mexicains qui sont à l'œuvre. En 1982, une équipe dirigée par Román Piña Chan concentre ses travaux sur les structures I-A, II, III et IV, qui sont encore majoritairement à l'état de monticules de terre et de végétation (Piña Chan, 1983). En dehors de la façade nord, la structure I-A est entièrement dégagée, reconstruite et consolidée (Fig. IV-2). L'intégralité des chambres est dégagée, et un mur de contention est construit au niveau supérieur pour remplacer le toit effondré.

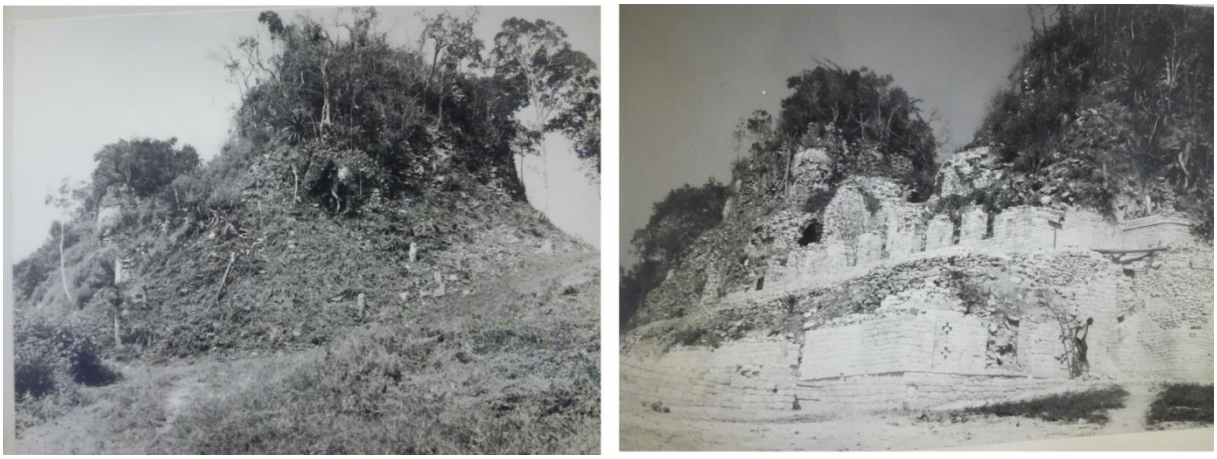


Fig. IV-2. Structure I de Becán avant (à gauche) et après (à droite) les travaux réalisés en 1982 (Piña Chan, 1983).

Le dégagement de la structure IV, commencé par Potter dix ans auparavant, est poursuivi (façade sud de l'édifice), et celui de la structure III est commencé. Il est achevé en 1983 avec consolidation du bâtiment. La structure II est également sortie de terre cette année-là (Fig. IV-3). Les panneaux à damiers qui ornent la façade est de l'édifice sont entièrement reconstruits avec des matériaux de la région incorporés dans leur position originale par anastylose. Le mélange utilisé pour les consolidations est composé de ciment, de chaux, et de sable en proportions égales. Cependant, pour les éléments iconographiques, la quantité de ciment est réduite de 25% et remplacée par de la chaux (Piña Chan, 1983).

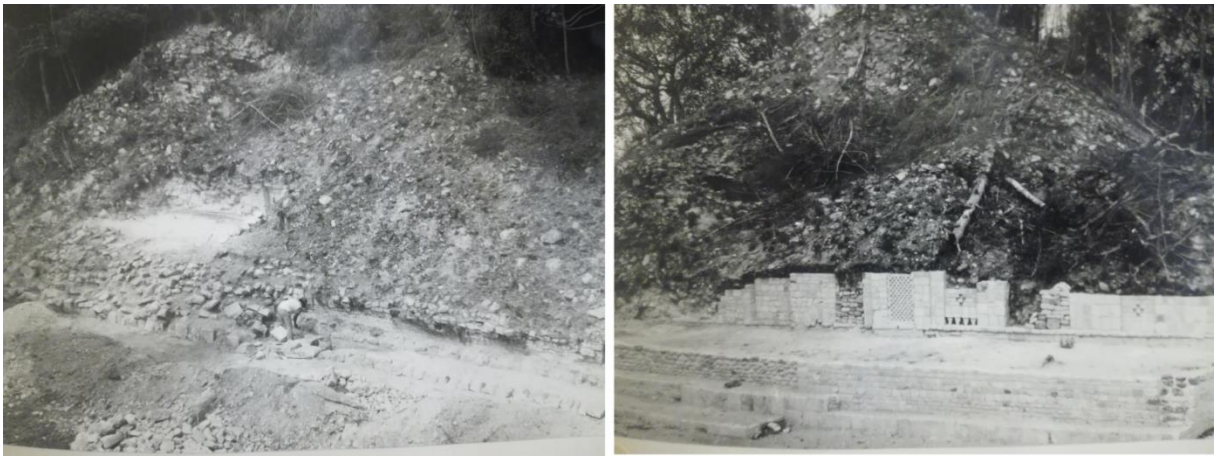


Fig. IV-3. Structure II de Becán au début des travaux de dégagement (à gauche), et panneaux à damiers après leur reconstruction (à droite) (Piña Chan, 1983).

En 1985, des interventions sont menées sur le site de Becán dans le cadre du *Programa de Desarollo y Fomento del Estado de Campeche* (Programme de Développement et de Promotion de l'État de Campeche). Les opérations concernent le dégagement des structures II (à finaliser) et V-B, ainsi que la consolidation partielle de

la structure V-A (Bueno et Gutierrez, 1985). La structure est nettoyée et libérée de la végétation, et sa partie supérieure correspondant au temple est dégagée (Fig. IV-4). Lors de cette opération, les pierres retrouvées *in situ* présentent un piètre état de conservation (Bueno et Gutierrez, 1985).

Fig. IV-4. Structure II de Becán après les opérations de Bueno (Bueno et Gutierrez, 1985).

Le dégagement de la structure V-B (surmontant la V-A, entre cette dernière et la IV) est également entrepris et les opérations de consolidation s'étendent au bâti environnant afin de mieux comprendre leur relation spatiale (Fig. IV-5).

Fig. IV-5. Dégagement et consolidation autour de la structure V-B à Becán (Bueno et Gutierrez, 1985).

A la fin de la saison 1985, le groupe est de Becán ressemble beaucoup à ce qu'il est aujourd'hui : les structures sont dégagées, consolidées, et la plupart des opérations futures seront des travaux de maintenance et de restauration.

1.1.3. Restaurations ultérieures

En 1992, le site de Becán fait l'objet d'interventions dans le cadre du *Proyecto Arqueológico Sur de Campeche* dirigé par Ricardo Bueno (Bueno *et al.*, 1992). Les

opérations consistent dans un premier temps à nettoyer les structures envahies par la végétation en raison du manque de maintenance. Le développement rapide de certaines espèces aux racines pénétrantes comme le *tajonal* (*Viguiera Dentata*) ou l'armoise (*Artemisia sp.*) menace l'intégrité structurelle du bâti. Par ailleurs, la croissance de la végétation a depuis longtemps été source d'inquiétude pour les autorités en charge des sites archéologiques, inquiétude traduite par l'application de diesel sur les structures dans les années soixante-dix (ce qui a d'ailleurs conduit à une pollution des sols en raison de la quantité massive appliquée), ou encore par l'utilisation massive de l'herbicide Gramoxone (contenant du paraquat qui agit comme un catalyseur au niveau de la chlorophylle pour fabriquer de l'eau oxygénée toxique pour la plante, aujourd'hui interdit en Europe et aux États-Unis) dans les années quatre-vingt-dix.

Les opérations reportées par Bueno *et al.* (1992) font également mention d'une campagne extensive de reforestation suite à l'exploitation intensive des compagnies forestières installées dans les villages de Zoh Laguna et Nicholas Bravo. En effet, les objectifs du *Proyecto Arqueológico Sur de Campeche* incluent la nécessité de conserver les biens culturels intégrés au milieu naturel. Si l'idée du rôle protecteur du couvert forestier en tant que « tampon » vis-à-vis des agressions climatiques y est présente, c'est surtout une vision « ruskinienne » de la restauration, où la ruine fait partie du monument et où la végétation a son rôle à jouer. De nombreuses espèces endémiques, à la canopée haute et étendue, et non invasives sur les structures sont alors plantées : acajou (*Swietenia sp.*), cèdre acajou (*Cedrela odorata*), gommier rouge (*Bursera simaruba*), noix-pain (*Brosimum alicastrum*), kapokier (*Ceiba pentandra*), quenettier (*Melicoccus bijugatus*), avocatier (*Persea americana*), ou encore tamarinier sauvage (*Lysiloma latisiliquum*). Les sentiers touristiques qui guident le visiteur à travers le site sont également ouverts.

Toujours en 1992, les archéologues et restaurateurs mexicains dirigés par Ricardo Bueno entreprennent des opérations de nettoyage des décombres produits par les précédents dégagements sur les structures I-A, V-A, II et IV, le dégagement de la façade nord de la structure I-A, ainsi qu'un certain nombre de consolidations. Les parements qui nécessitent une intervention sur les structures II et III sont consolidés lors de cette campagne, ainsi que les niveaux supérieurs de la structure IV. L'état de détérioration avancé de la structure V-A, dégagée par Messenger (1975), impose une intervention immédiate. Le mélange utilisé pour la consolidation lors de cette campagne suit la règle

des 3*2*1, c'est-à-dire que pour 1 unité de ciment, 2 unités de chaux et 3 unités de *sascab* (« terre blanche » en maya, poudre de calcaire pilé) sont incorporées au mortier (Bueno *et al.*, 1992). L'intégralité des structures du groupe est feront également l'objet d'opérations de maintenance (nettoyage de la végétation et consolidations ponctuelles) au cours de l'année suivante (Bueno *et al.*, 1994).

Dans les années deux-mille, c'est le *Proyecto Arqueológico Becán* qui prend la suite des précédentes interventions, sous la direction de Luz Evalia Campaña Valenzuela. En 2000 et 2001, la première saison (Campaña Valenzuela *et al.*, 2001) est consacrée à la restitution d'un effondrement sur la chambre située à l'extrême ouest du premier niveau de la structure I-A, ainsi qu'à la reconsolidation des chambres des niveaux supérieurs de la structure IV. Mais c'est essentiellement lors de la saison 2003-2004 que des réparations et reconstruction sont effectuées, suite au passage dévastateur de l'ouragan Isidore (catégorie 3 sur l'échelle de Saffir-Simpson, des vents à plus de 200 km/h, 760mm de précipitations en moins de 36 heures, 24 morts et plus d'un milliard de dollars de dommages) en 2002 (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004). La structure I-A fait l'objet d'interventions intensives : les décombres des divers effondrements sont retirés et une terrasse d'accès aux chambres du niveau supérieur est construite (Fig. IV-6) en appui sur les voûtes des chambres inférieures.

Fig. IV-6. Construction en cours (à gauche) et finalisée (à droite) de la terrasse d'accès au niveau supérieur de la structure I (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004).

La construction de cette terrasse au niveau supérieur change drastiquement l'aspect de la structure I-A, et permet une toute autre vision des chambres qui sont désormais couvertes et abritées par la voûte (Fig. IV-7). L'intégrité structurelle de l'édifice est également renforcée par les linteaux de soutènement en acier positionnés sur les accès des chambres inférieures (Fig. IV-8).

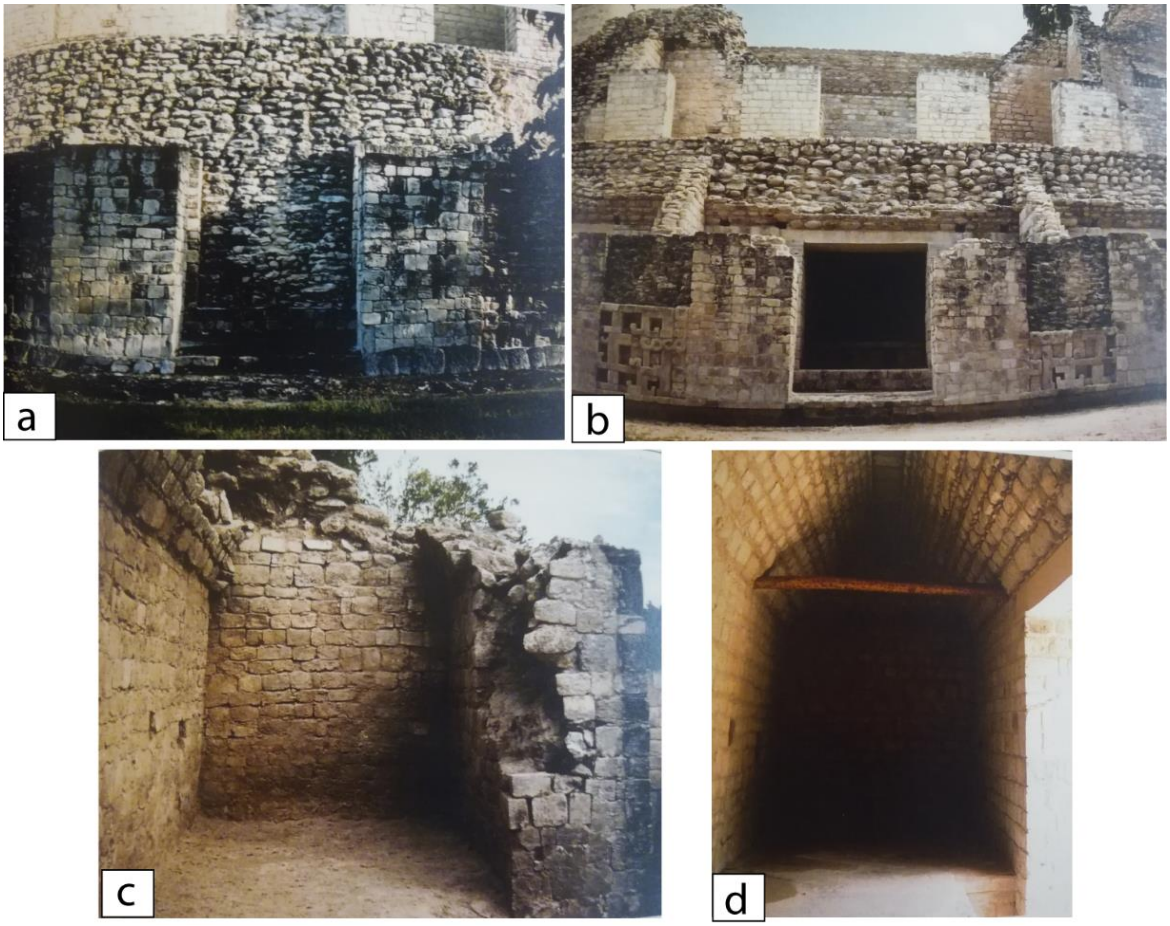


Fig. IV-7. Vue frontale de la structure I-A avant (a) et après intervention (b), et vue intérieure d'une chambre du niveau inférieur avant (c) et après (d) remontage de la voûte et construction de la terrasse (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004).

Fig. IV-8. Linteaux de soutènement incorporés aux accès des chambres inférieures de la structure I-A (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004).

Outre l'intervention intensive de la structure I-A, cette campagne de 2003-2004 est aussi marquée par la restauration des panneaux à damiers de la structure II, justifiée par leur qualité décorative et leur état avancé de détérioration (Fig. IV-9).

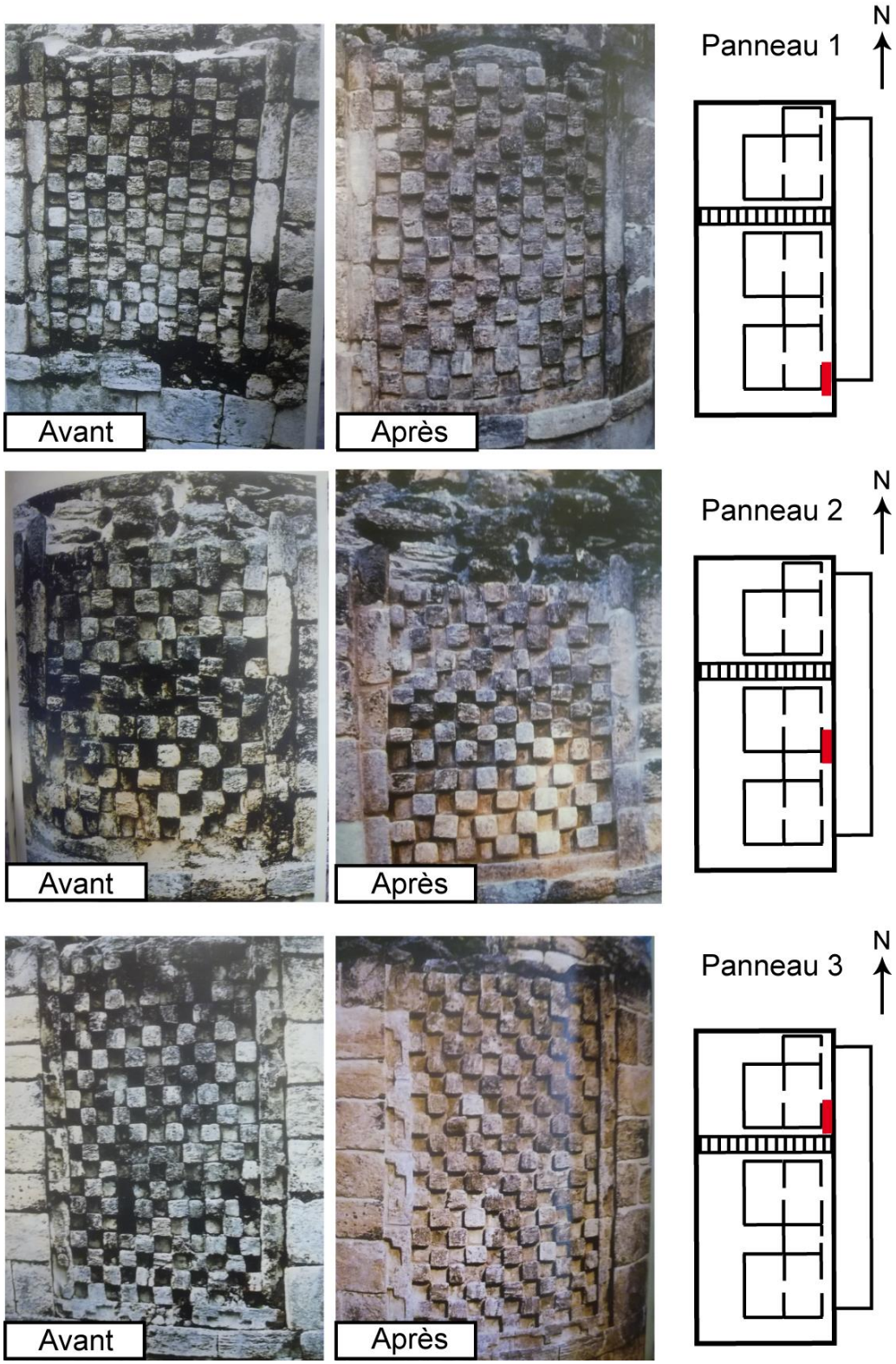


Fig. IV-9. Clichés des panneaux à damiers de la façade est de la structure II avant et après leur restauration (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004).

Les dernières opérations de restauration sur le site de Becán ont lieu en 2009 (Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009) avec le nettoyage et la consolidation des tours de la structure I, du temple sommital du niveau supérieur de la structure II, du coin nord-

ouest et de la partie sud de la structure III, et de la façade est de la structure IV. Au total, le site archéologique de Becán aura connu plusieurs phases d'intervention qui seront résumées et mises en perspective à la fin de ce chapitre. Malheureusement, l'archéologue Ricardo Bueno Cano, l'un des plus actifs intervenants sur ce site, est tombé très malade dans les années quatre-vingt-dix avant de décéder en 1995, et son état de santé ne lui a pas permis de publier un certain nombre de ses derniers rapports d'intervention. Il est donc possible que certaines opérations ne soient pas référencées (Antonio Benavides Castillo, com. pers. 2013).

1.2. Xpuhil

Situé non loin de Becán, le site archéologique de Xpuhil (de « *xpuh* » : « queue de chat » en maya yucatèque, en référence à un type de végétation locale, suivi du suffixe « *il* » pour « lieu de », signifie « lieu des queues de chat ») a connu une trajectoire relativement similaire à son voisin en termes de chronologie et de types d'interventions.

1.2.1. Découverte et observations initiales

A l'instar de Becán, Xpuhil a été redécouvert et visité du 20 au 25 février 1938 par la troisième expédition de la *Carnegie Institution*, dont les observations initiales ont été rapportées par Ruppert et Denison (1943). Ces derniers mentionnent la présence de plusieurs monticules et de quelques structures partiellement intactes.

La structure I est celle qui retient le plus l'attention des explorateurs. D'abord par son architecture, qui incorpore une troisième tour centrale au lieu des deux tours typiques du style Río Bec, mais surtout par ses dimensions et par son état de conservation. Douze chambres sont visibles, ainsi que les escaliers ornementaux des tours et la plateforme basale de la structure. La façade principale, à l'est, dont quelques portions protégées par les tours sont encore intactes, est ouverte sur l'intérieur par trois entrées, décorées de panneaux ornés de masques. La tour centrale est bien mieux conservée que les tours nord et sud, la plupart de ses façades et de ses angles arrondis sont en position et le tiers supérieur de l'escalier ornemental est intact. En ce qui concerne les chambres, les parements intérieurs subsistent à de rares endroits entre 4,05 et 4,48 m de hauteur, surmontés de voûte qui s'élèvent entre 1,50 et 2,04 m (Ruppert et Denison, 1943).

Seulement quelques maçonneries dépassent des débris de la structure II, mais la configuration des 5 chambres qui reposent sur une plateforme se distingue, ainsi qu'un monticule au sud sans aucune maçonnerie en place. La structure III est uniquement décrite comme une série de quatre chambres longitudinalement alignées et orientées au nord, reposant sur une plateforme de faible hauteur. Sur la structure IV, de petites sections de maçonneries sont toujours intactes, et on mentionne un monticule pyramidal d'environ 5 m de haut, surmonté d'une structure à deux chambres.

Si, comme pour Becán, le rapport de Ruppert et Denison est essentiellement descriptif, il est extrêmement succinct pour Xpuhil. Il apparaît néanmoins qu'aucune opération de dégagement ou de consolidation n'a été effectuée avant les années soixante-dix.

1.2.2. Dégagement des structures et consolidations

Les premières interventions effectuées à Xpuhil ont lieu 1977 et 1978, dans le cadre des *Brigadas de Rescate* (Brigades de Sauvetage) du Centre Régional INAH de Campeche. Ces opérations, dirigées par Augustín Peña, se concentrent sur la consolidation d'urgence *in situ* des pierres de la structure I (Piña Chan et Landa, 1983 ; Bueno Cano et Gutierrez, 1985). L'objectif principal de ces brigades, très actives avant les années quatre-vingt et les campagnes de restauration d'envergure bien financées, est d'assurer l'intégrité structurelle du bâti archéologique en intervenant ponctuellement lorsque les structures menacent de s'effondrer en raison de leur état de détérioration, ou encore en prévention d'événements météorologiques majeurs.

En mars 1982, une campagne de travaux a lieu sur la structure I de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983). Dirigées par Roman Piña Chan, ces fouilles archéologiques ont pour principal objectif l'exploration de la structure, appelée *Edificio de las Tres Torres* (« Édifice des trois tours »). Au début des travaux, la façade principale montre des traces des consolidations de Peña à la fin des années soixante-dix : les pierres sortantes de la maçonnerie ont été rejointoyées avec un mortier afin d'éviter les effondrements et la croissance de la végétation. De massives accumulations de débris sont cependant présentes au pied des maçonneries, et aucun parement n'est réellement visible (Fig. IV-10).

Fig. IV-10. Clichés des façades est (à gauche) et ouest (à droite) de la structure I de Xpuhil avant les travaux de 1982 (Piña Chan et Landa, 1983).

Les opérations commencent donc par le dégagement du coin formé par la tour sud et la chambre annexe sur la façade ouest. Les archéologues remarquent alors que toutes les pierres de parement sont manquantes, comme si elles avaient été retirées. Ils entreprennent donc le repositionnement et la consolidation des matériaux « arrachés ». Les travaux continuent avec l'exploration et le nettoyage des chambres de la partie sud-ouest de l'édifice, où les blocs de maçonnerie sont également restitués (Fig. IV-11).

Fig. IV-11. Consolidation des chambres sud de la structure I de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983).

La façade principale (orientée à l'est) est également reconstruite avec une attention particulière portée aux éléments iconographiques, nettoyés soigneusement et consolidés immédiatement avec un mélange contenant du ciment blanc (Fig. IV-12). Les pierres de parement sont restituées bloc par bloc avant de procéder à quelques remplacements par des nouveaux matériaux. Enfin, les décombres sont dégagés et les chambres voûtées

impossibles à restaurer sont remplies de matériaux tout-venant et intégrées à la structure. Les travaux terminent par la consolidation des chambres annexes de la partie nord.

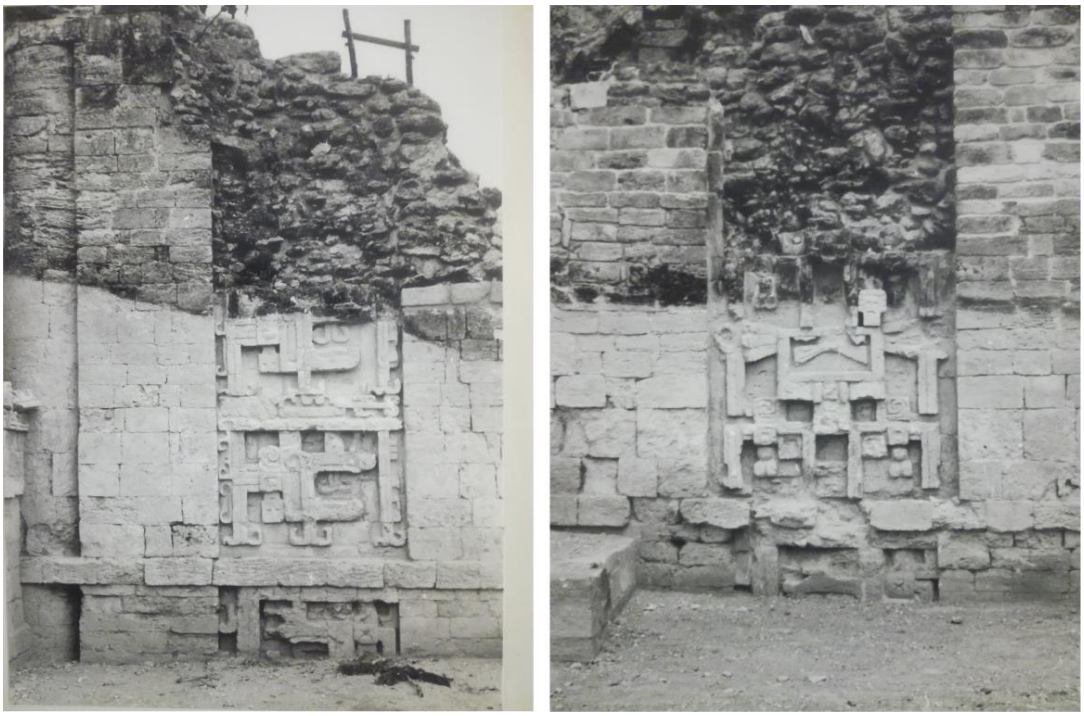


Fig. IV-12. Restauration achevée des éléments iconographiques de la façade est de la structure I de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983). On remarque la séparation entre la portion dégagée et restaurée (blanchâtre) et la portion restée exposée à l'air libre (plus foncée).

Les interventions se poursuivent l'année suivante, en 1984, avec le dégagement partiel de la structure II, et en 1985 avec des interventions de maintenance effectuées par Ricardo Bueno Cano (Bueno et Gutierrez, 1985). Ces dernières concernent plusieurs secteurs inférieurs de la tour centrale de la structure I, ainsi qu'une grande partie des chambres non dégagées jusqu'alors. Le dégagement de la structure II est achevé et l'édifice est consolidé. En 1992 et 1993, le *Proyecto Arqueológico Sur de Campeche* intervient sur le site de Xpuhil parallèlement aux autres sites de la région (Bueno *et al.*, 1992). Les structures III et IV sont entièrement dégagées, aucune voûte n'est retrouvée intacte. Une intervention d'urgence est effectuée sur la structure de Xpuhil 2, à quelques centaines de mètres du site principal, avec réintégration et consolidation du linteau de la porte d'entrée. Peu référencée, cette structure aurait été découverte par Jack Eaton lors de l'exploration de la zone par la *Tulane University* à la fin des années soixante-dix. La crête faîtière et certaines sections de murs de Xpuhil 2 sont consolidées en 1993, ainsi que l'ensemble des structures du site principal où les opérations sont finalisées.

Les interventions sur le site de Xpuhil ont donc été menées en parallèle du site de Becán, bien que les opérations y aient été plus intensives. La proximité des deux sites permet en effet l'intégration des interventions dans les mêmes programmes, et leur situation, non loin des axes routiers principaux et des villages locaux, offre un cadre logistique plutôt favorable. Ce n'est pas le cas du site éponyme de Río Bec, dont la plupart des structures se trouvent en pleine forêt, à 8 km des premières habitations.

2. Río Bec, le site éponyme

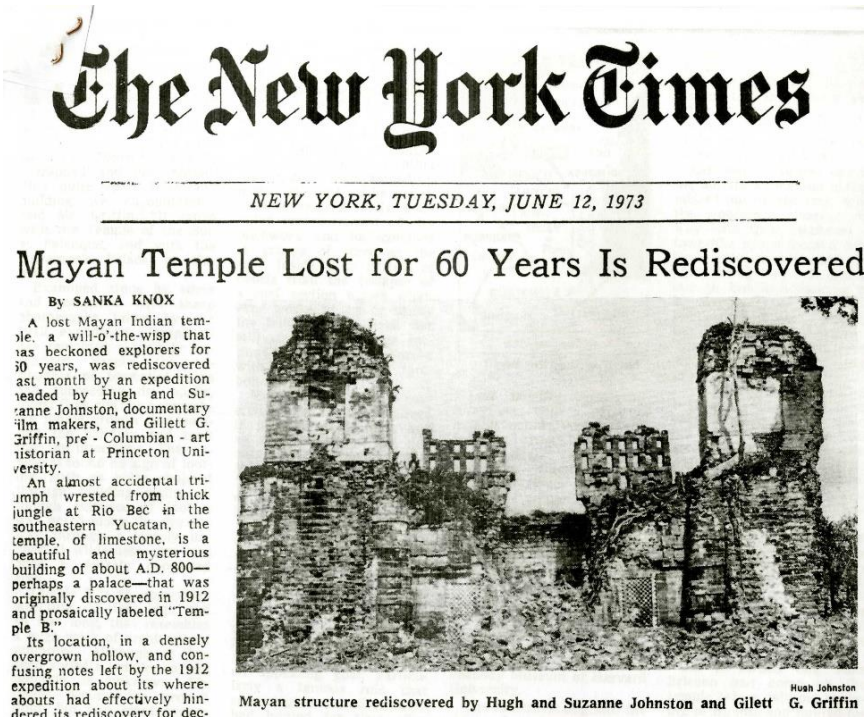
Le site de Río Bec est, à la fin de la période classique (de 600 apr. J.-C. à 900 apr. J.-C.), le plus développé des ensembles de groupes monumentaux rassemblant les singularités du style architectonique éponyme (Arnauld *et al.*, 2014). L'absence de nucléation autour de centres urbains définis, caractéristique de ce dernier, implique une grande dispersion des structures dans ce qui est aujourd'hui une zone de forêt dense, relativement éloignée des principaux centres urbains et des voies de communication modernes.

2.1. Découverte et premières opérations

Si la zone correspondant au site archéologique de Río Bec est explorée à la fin du XIXe siècle par le géographe allemand Karl Sapper (Sapper, 1895a et 1895b), on attribue souvent sa découverte à l'explorateur français Maurice de Périgny, dont les observations ont été publiées au début du XXe siècle (Périgny, 1908), à l'occasion de son troisième voyage dans les Basses terres en 1906-1907. En effet, bien qu'il n'y accorde qu'une importance mineure au cours de ces explorations, il est le premier à identifier le style architectonique Río Bec et à le rattacher avec insistance à la civilisation maya, porté par l'objectif de combler le vide entre les sites du Petén et ceux du Yucatán (Taladoire, 1995).

En 1912, une nouvelle expédition financée par le *Peabody Museum* et dirigée par Robert E. Merwin parcourt la zone de Río Bec. Une demi-douzaine de nouveaux groupes sont découverts, dont la structure I du groupe B qui se distingue par son état de conservation exceptionnel, et la structure I du groupe A qui s'impose rapidement comme l'édifice paradigmatique du style Río Bec (Merwin, 1913). C'est à partir de là que la communauté mayaniste reconnaît qu'il s'agit d'un style complètement nouveau, auquel seront rattachés les sites archéologiques de Becán, Xpuhil, Hormiguero et Okolhuitz,

après les découvertes des expéditions de la *Carnegie Institution* rapportées par Ruppert et Denison (1943). Pourtant, malgré la nouveauté et l'originalité architecturale et stylistique de ce secteur, le site de Río Bec va retomber dans l'oubli jusqu'en 1973. Il va alors être redécouvert presque par hasard lors d'une expédition organisée par un couple de cinéastes canadiens et dirigée par Gillett Griffin, historien à l'université de Princeton. La nouvelle fait alors la une du *New York Times* (Fig. IV-13) et est rapportée à l'INAH (Seuffert, 1974).



The New York Times

NEW YORK, TUESDAY, JUNE 12, 1973

Mayan Temple Lost for 60 Years Is Rediscovered

By SANKA KNOX

A lost Mayan Indian temple, a will-o'-the-wisp that has beckoned explorers for 50 years, was rediscovered last month by an expedition headed by Hugh and Suzanne Johnston, documentary film makers, and Gillett G. Griffin, pre - Columbian - art historian at Princeton University.

An almost accidental triumph wrested from thick jungle at Rio Bec in the southeastern Yucatan, the temple, of limestone, is a beautiful and mysterious building of about A.D. 800—perhaps a palace—that was originally discovered in 1912 and prosaically labeled "Temple B."

Its location, in a densely overgrown hollow, and confusing notes left by the 1912 expedition about its whereabouts had effectively hindered its rediscovery for dec-

Hugh Johnston

Mayan structure rediscovered by Hugh and Suzanne Johnston and Gilett G. Griffin

Fig. IV-13. La une du *New York Times* lors de la redécouverte du site de Río Bec, en 1973.

Après la redécouverte du site, lors de laquelle un nettoyage partiel de la structure B (aujourd'hui appelée 6N1) est effectué pour la réalisation du documentaire *Mystery of the Maya* par les cinéastes canadiens, les premières fouilles officielles sont financées par la *Universidad de las Americas*, et dirigées par Prentice Thomas en 1976. Ces opérations, dont le rapport est publié trente ans plus tard (Thomas et Campbell, 2008), se concentrent sur le dégagement et la consolidation des chambres centrales et sud, ainsi que des façades sud et ouest de 6N1. Le rapport des fouilles suivantes, dirigées par Agustín Peña Castillo dans le cadre du *Proyecto Arqueológico Frontera Sur* en 1984, mentionne ces interventions qui, si elles ont permis une certaine conservation de l'édifice, ne sont pas suffisantes pour assurer une intégrité structurelle pérenne à l'ensemble architectural (Peña Castillo *et al.*, 1984). Lors de cette campagne, le dégagement des chambres nord et de la façade adjacente est entrepris, avec consolidation préalable de la tour nord. Les parements intérieurs, jusque-là enfouis sous

les décombres, se révèlent être en meilleur état de conservation, et les problèmes structurels constatés sont imputés à la perte du mortier. Les linteaux des faux temples situés au sommet des tours sont repris, et la crête faitière – unique exemplaire intact dans le secteur – est nettoyée et consolidée. Dans les extrémités des chambres centrales, dont les voûtes sont en parties conservées, les matériaux désagrégés sont remplacés et des *tapas de boveda* (« bouchons de voûte », blocs de soutènement assurant l'intégrité des voûtes) sont réintroduits. Les murs intérieurs des chambres latérales, construits comme des contreforts supportant les tours, sont consolidés et les fissures apparentes sont remplies de mortier. Enfin, les panneaux à damiers situés sur trois des quatre façades de l'édifice, présents et exposés, nécessitent une intervention en raison de leur état de détérioration avancé. Sur les panneaux de la façade est, des éléments sont donc remplacés sur le second plan en respectant la géométrie, alors que les éléments originaux retrouvés lors du dégagement sont simplement réintroduits sur le premier plan. Complet, détaillé et comportant un certain nombre de clichés originaux (Fig. IV-14), le rapport de Peña Castillo *et al.* (1984) fait aussi brièvement allusion à la tour ouest de la structure du groupe A (5N2 dans la nomenclature actuelle, n'ayant fait jusqu'ici l'objet d'aucune intervention), dont seuls les quatre corps supérieurs du coin nord-ouest sont exposés.

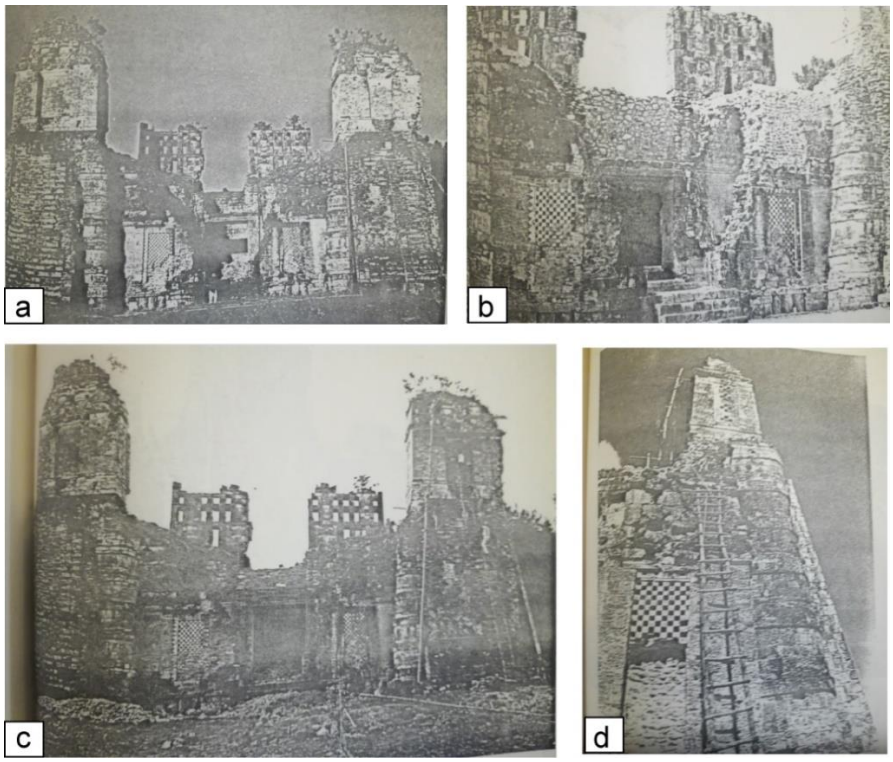


Fig. IV-14. Clichés de 6N1 avant (a) et après (b) les opérations de Peña Castillo en 1984, restauration et consolidations sur la façade est (c) et sur les faux temples (d) (Peña Castillo *et al.*, 1984).

Plus tard, dans les années quatre-vingt-dix, Ricardo Bueno Cano effectue des nettoyages de végétation sur la structure 6N1 en 1992 (Bueno Cano *et al.,* 1992) et 1993 (Bueno Cano *et al.,* 1994), sans pratiquer de dégagement de grande ampleur ou de consolidation. C'est seulement au début des années deux-mille, à l'initiative du laboratoire français « Archéologie des Amériques », qu'est lancé le Projet Río Bec au cours duquel des prospections et opérations de fouilles et de consolidation sont entreprises sur le site éponyme jusqu'en 2010.

2.2. Le projet Río Bec (2002-2010)

L'intérêt porté au site éponyme de Río Bec est motivé par l'originalité de la variante architecturale qui y est développée : palais aux chambres multiples ornés de décorations, absence de terrains de jeu de balle et de temples-pyramides, système de tours jumelles avec des escaliers non fonctionnels, peu d'érection de stèles et un habitat dispersé, sans nucléation autour de centres urbains définis. L'hypothèse de départ du projet Río Bec est que le particularisme du site se fonde sur une organisation socio-politique singulière, distincte du système de cités-états prévalent dans le monde maya traditionnel. Développé entre 2002 et 2010, le projet a pour objectif d'élucider les conditions environnementales, économiques, sociales et politiques qui accompagnent l'apogée de ce site (Nondédéo *et al.,* 2002 ; Michelet *et al.,* 2004, 2005, 2006, 2007, 2008a et 2009 ; voir aussi Michelet *et al.,* 2008b et Arnauld *et al.,* 2014).

La première saison du projet Río Bec (Nondédéo *et al.,* 2002) se concentre sur la relocalisation et la visite des principaux groupes « historiques » du secteur, l'établissement d'un quadrillage de prospection de 1x1,5 km et le nettoyage de la végétation sur un nombre réduit d'édifices. Cette libération des structures a pour objectif de stopper temporairement la détérioration induite par l'action mécanique des racines, de permettre un premier registre photographique et une première collecte de données, de restituer une image plus décente aux éventuels visiteurs, mais aussi de préparer les futurs dégagements.

La deuxième saison, en 2003, est d'une tout autre ampleur puisqu'un grand nombre d'opérations sont menées sur plusieurs structures de Río Bec (Michelet *et al.,* 2004). Parmi celles du groupe B, la structure 6N2 (à laquelle nous nous sommes intéressés dans ce travail) a été dégagée partiellement afin d'identifier sa fonction. Des

travaux de restauration et de conservation sont également entrepris, notamment sur 6N1. Le diagnostic de détérioration pointe encore une fois du doigt la croissance végétale due au manque d'entretien, provoquant fissures sur les recouvrements extérieurs, jonctions des parements et surfaces planes, mais également perte des aplats, entraînant des écroulements et la pulvérulence des matériaux exposés. En effet, on trouve ici une allusion aux interventions humaines comme facteur de détérioration, et notamment au ciment de Portland, imperméable, bloquant la circulation de l'eau et entraînant une cristallisation épilithique et endolithique des sels solubles. L'intervention post-diagnostic se concentre sur le rejointoiement avec des mortiers plus adaptés, composés majoritairement de *sascab* agrémenté d'extraits végétaux régionaux comme le *Chucúm* ou le *Chacá,* mais toujours avec une petite portion de ciment gris, sur la structure I du groupe A (5N2) et sur 6N1 et 6N2. Les fissures sont remplies, et les blocs tombés au sol sont réintroduits. Sur les éléments restitués qui sont trop détériorés, on applique un enduit à base de chaux et de *sascab* afin d'uniformiser la surface des parements et de combler les pertes de matière.

Lors de la saison 3 du projet en 2004 (Michelet *et al.,* 2005), les opérations se concentrent sur le dégagement de la structure I du groupe A (5N2), quasiment non intervenue jusque-là (Fig. IV-15), et les travaux de restauration et de conservation sont poursuivis sur le groupe B.

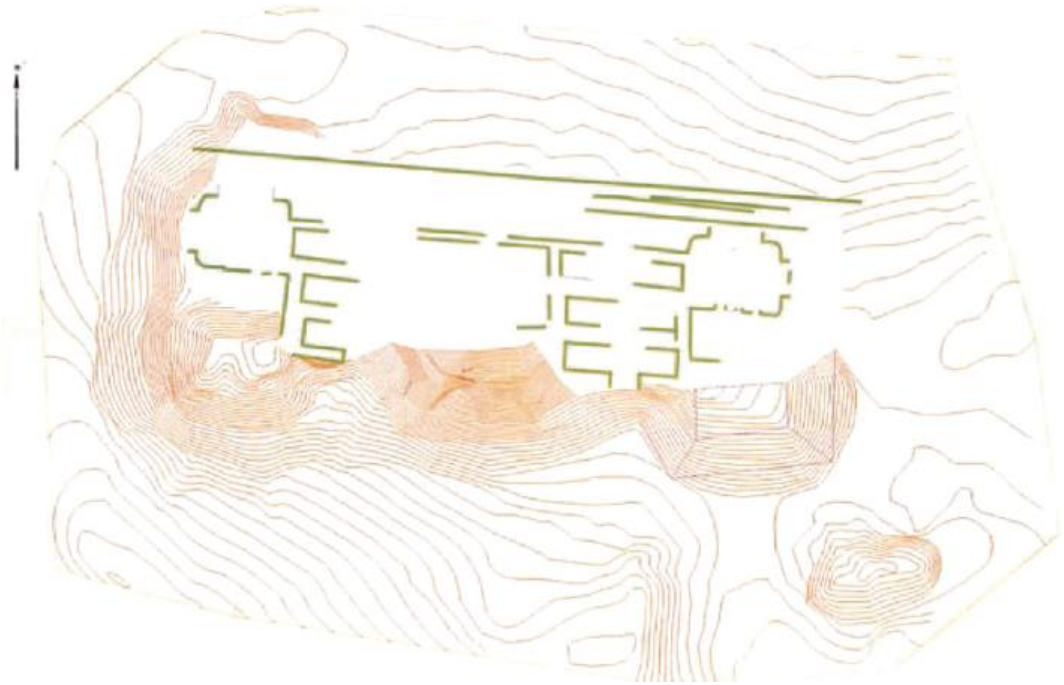


Fig. IV-15. Croquis préliminaire au dégagement de 5N2 en 2004 (dessin de G. Marchand, dans Michelet *et al.,* 2013).

Sur 6N2, la libération de l'aile nord est achevée avec réintégrations et remplacements de pierres, et l'aile sud est consolidée avec notamment le comblement d'une fissure à l'aide d'un mélange agglutinant. Le dégagement de la structure 7N1 du groupe D, également intégré à notre corpus, est amorcé. Sur 5N2, la totalité de la tour nord est libérée et consolidée, ainsi que le patio sud et une salle de l'aile nord où les matériaux sont réintroduits ou remplacés. Le secteur faisant face à la façade nord est déboisé. Cette dernière comporte des panneaux iconographiques qui sont aspergés d'*agua de cal* (« eau de chaux », mélange d'eau et de fines particules de calcaire pilé, qui peut potentiellement accélérer la cimentation des matériaux). Le dégagement final et la consolidation de cette section nord sont menés conjointement à celui de la partie est de la structure lors de la quatrième saison en 2005 (Michelet *et al.,* 2006), lors de laquelle des dégagements complémentaires sont opérés sur 6N2 en vue de sa consolidation finale, effectuée la même année. Au cours de cette saison, les alentours de 6N1 et 5N2 sont également déboisés.

Un grand nombre des opérations de la cinquième saison, en 2006 (Michelet *et al.,* 2007), concerne la finalisation des travaux de consolidation et de dégagement sur 5N2. La base pyramidale sud, les parties supérieures de la façade nord de la tour nord-est, les parements des chambres centrales sont consolidés, et les dégagements de la façade nord et de la chambre D sont achevés (Fig. IV-16).

Fig. IV-16. Clichés de la tour nord-est de 5N2 avant (à gauche), pendant (au centre), et après (à droite) les opérations de la cinquième saison du Projet Río Bec en 2006 (Michelet *et al.,* 2007).

Lors de cette cinquième saison, la base de 6N2 est consolidée et, sur le groupe D, les façades nord, est et ouest de la structure 7N1 sont dégagées et consolidées (Fig. IV-17).

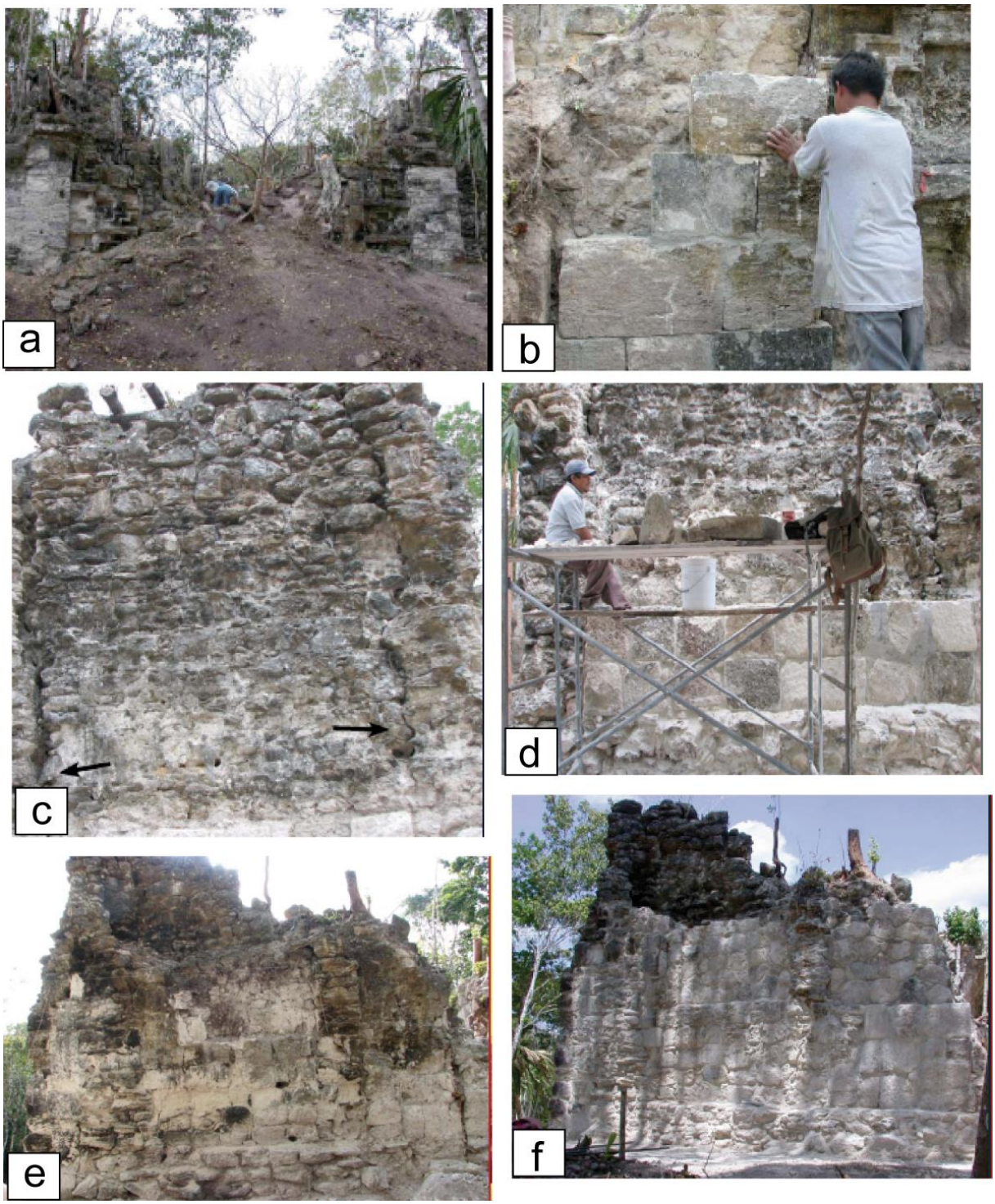


Fig. IV-17. Clichés pré et post-intervention de la structure 7N1 du groupe D : façade nord avant (a) et pendant (b), façade est avant (c) et pendant (d), et façade ouest avant (e) et après (f) les opérations de dégagement et consolidation en 2006 (Michelet *et al.,* 2007).

En 2007, les interventions se poursuivent lors de la sixième saison du projet Río Bec (Michelet *et al.*, 2008a). Parmi celles-ci, les travaux de restauration et de consolidation sont poursuivis sur 5N2, avec notamment le dégagement de la tour nord-ouest (Fig. IV-18), et des chambres E et F où les voûtes sont restituées (Fig. IV-19). Les éléments iconographiques de la façade nord de 5N2 ainsi que ceux de 7N1 sont reconstruits. Plusieurs interventions de conservation préventive (canalisation des eaux de pluie, recouvrements de protection) sont effectuées, et les algues et micro-organismes colonisant la façade nord de 5N2 et sur 7N1 sont éliminés chimiquement à l'aide d'un mélange d'eau et d'alcool (proportions 1 : 1).

Fig. IV-18. De gauche à droite : progression du dégagement de la tour nord-ouest de 5N2 en 2007 (Michelet *et al.,* 2008).

Fig. IV-19. Restitution des voûtes sur les chambres de 5N2 en 2007 (Michelet *et al.,* 2008).

Enfin, la septième saison du projet Río Bec a lieu en 2008 (Michelet *et al.,* 2009). Sur 5N2, c'est surtout le secteur sud qui fait l'objet d'interventions avec la libération des chambres G et H, le dégagement du patio sud-est et de son système d'accès, et la finalisation des interventions sur la tour nord-ouest. Des travaux sont aussi effectués sur les chambres E, F et G, ainsi que sur la tour nord-est et les façades nord, ouest et sud. Les consolidations et restaurations concernent également les structures 7N1 et 6N1, où des opérations de conservation préventives sont menées, notamment par l'application de *capa de sacrificio*, un enduit à base de chaux destiné à se détériorer en lieu et place des matériaux recouverts afin de retarder l'érosion de ces derniers.

Au même titre que Becán et Xpuhil, le site éponyme de Río Bec a ainsi fait l'objet d'interventions intensives. Néanmoins, la temporalité des opérations – annuelles et regroupées sur moins d'une décennie – s'en distingue autant que les méthodes et techniques de restauration, qui y sont plus modernes. En effet, si le ciment est toujours présent dans les mortiers de remplacement, il l'est en quantité moindre, et l'utilisation de techniques de conservation préventive traduit un souci de pérennisation des matériaux en tentant d'éviter des opérations de maintenance régulières. De même, l'uniformité de la méthodologie développée d'année en année sur un même projet permet une vision plus claire des choix qui ont été faits sur les opérations de restauration, notamment quant aux réintégrations ou remplacements de matériaux, ou aux types d'enduits utilisés. Mais surtout, le caractère détaillé des rapports du projet Río Bec permet un contrôle chronologique complet, sur lequel nous aurons l'occasion de revenir afin de préciser l'interprétation de certains résultats concernant l'étude de la dynamique érosive sur ce site.

3. Classification des structures et définition de trajectoires d'intervention

Si le recensement exhaustif des interventions humaines pratiquées sur les structures archéologiques est un préalable indispensable, il doit aboutir à la construction d'un cadre d'analyse permettant la mise en perspective et l'interprétation des résultats correspondant aux autres objectifs. Grâce à l'étude des rapports de fouilles et de restauration, il est d'abord possible d'établir une typologie des interventions, puis une chronologie synthétique des opérations sur les structures sélectionnées afin de définir des trajectoires d'intervention pour ces dernières.

3.1. Typologie des interventions

Par-delà leur apparente diversité, les interventions humaines sur le bâti archéologique sont fondamentalement homogènes. En effet, si les paradigmes ou visions de la restauration peuvent varier selon les intervenants ou les acteurs institutionnels, l'ensemble des pratiques adoptées lors des campagnes de fouilles et de restauration reste uniforme. Afin d'affiner notre cadre d'analyse, nous pouvons cependant en distinguer trois grands groupes (Fig. IV-20), auxquels se rattachent des objectifs précis.

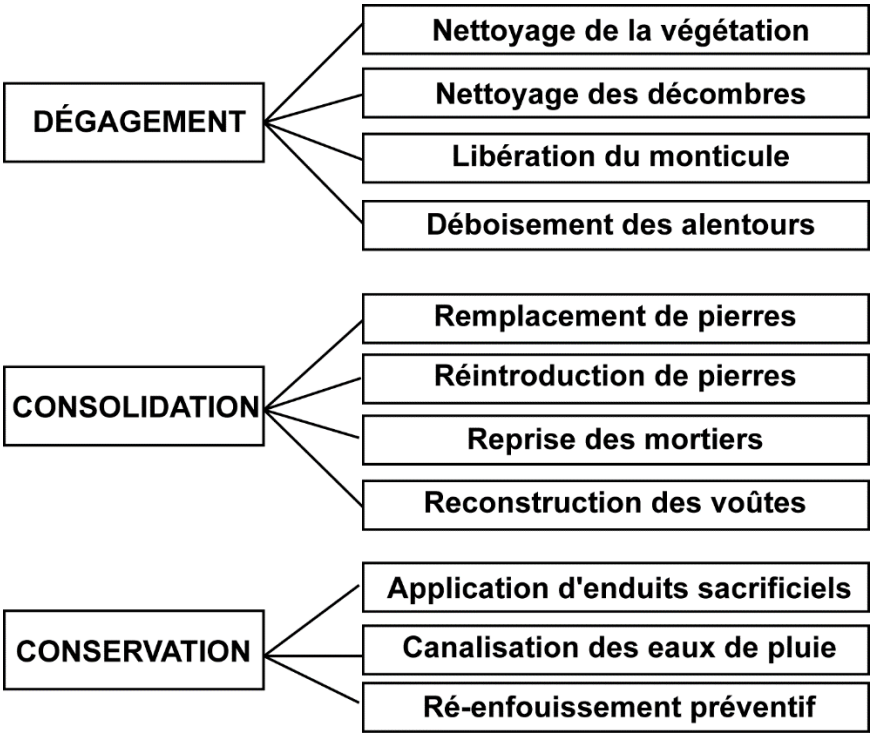


Fig. IV-20. Typologie des interventions mentionnées dans les rapports de fouilles et de restauration concernant le secteur Río Bec.

Le premier groupe concerne les **opérations de dégagement**, généralement effectuées lors des campagnes de fouilles, et dont le principal objectif est de retrouver l'information archéologique. Généralement redécouvertes à l'état de monticules de terres couverts de végétation, les structures mayas du secteur Río Bec font d'abord l'objet d'un nettoyage de cette dernière par diverses méthodes : mécaniques ou chimiques par pulvérisation d'herbicide ou encore injection de diesel (Bueno *et al.,* 1992). La principale intervention qui est ensuite effectuée est la libération de la structure du monticule dans lequel elle est enfouie, exposant ainsi les matériaux dégagés à l'air libre et aux agents bioclimatiques. C'est l'étape clé des opérations de dégagement, puisque cette opération modifie drastiquement l'équilibre entre les facteurs de contrôle qui régissent l'érosion de la pierre monumentale. Enfin, une fois les structures libérées, les décombres produits

qui peuvent s'accumuler à l'intérieur ou au pied des façades des édifices sont retirés. Après ces opérations de dégagement, ce sont les alentours immédiats des structures qui sont concernés par les interventions. Celles-ci se concentrent la plupart du temps sur le déboisement du couvert végétal à proximité du bâti pour offrir une meilleure vue aux visiteurs, il arrive parfois que des arbres soient replantés, l'effet modérateur de ces derniers vis-à-vis des agressions climatiques étant parfois reconnu (Bueno *et al.,* 1992).

Le deuxième groupe d'interventions identifié concerne les **opérations de consolidation** qui ont pour principal objectif d'assurer l'intégrité structurelle du bâti archéologique. Comme les opérations de dégagement, elles visent également à reconstituer les aspects architectoniques afin de les étudier dans leur contexte et de restituer aux visiteurs une image plus fidèle des structures originelles. Dans cet ensemble, il est important de distinguer la réintroduction des matériaux originels des remplacements par de nouveaux matériaux, même s'ils sont de nature similaire. Les premiers ont en effet déjà été extraits, travaillés, puis insérés dans un ensemble hétérogène et soumis à des stress climatiques, alors que les seconds sont « frais » et n'ont connu d'autre impact anthropique que celui de leur extraction récente. Les opérations de consolidation regroupent également les rejointoiements et reprises des mortiers, souvent complètement détériorés lors de la redécouverte des structures, ce qui porte préjudice à l'intégrité structurelle du bâti. Intervention courante et quasi systématique, son impact sur les modalités et vitesses de l'érosion postérieure est néanmoins tributaire de la composition des mélanges utilisés, pouvant incorporer du ciment, des extraits végétaux, ou toute autre substance pouvant être source de sels solubles. Dans le secteur Río Bec cependant, c'est plutôt l'analogie avec les mortiers mayas traditionnels qui commande à l'élaboration des mélanges utilisés. Bien que le ciment soit systématiquement incorporé à ces derniers, les proportions sont, à de rares exceptions, généralement faibles, au profit de la chaux et du *sascab* local. Enfin, la reconstruction des voûtes, partielle ou complète, est également une intervention récurrente dans le secteur Río Bec, où l'on trouve de nombreuses chambres internes originellement voûtées. Il semble que les autorités demandent généralement aux archéologues de pratiquer cette opération lors des campagnes de fouilles et de restauration, avec l'idée que les voûtes protègent les parements adjacents des eaux de pluies et des différents agents bioclimatiques (Dominique Michelet, com. pers. 2013).

Pour terminer, les **opérations de conservation**, dont l'objectif est de prévenir la détérioration postérieure des matériaux, constituent le troisième groupe d'interventions identifié. Parmi celles-ci, on trouve des interventions directes telles que l'application d'enduits sacrificiels, lesquels sont apposés sur les surfaces exposées afin d'encaisser les stress environnementaux en lieu et place des matériaux de construction. Distincts des enduits et baptisés différemment, les *agua de cal, leche de cal,* ou *capa de sacrificio*, sont surtout employés dans le cadre du projet Río Bec sur le site éponyme où la détérioration accélérée des structures après leur dégagement constitue un défi. De même, des opérations de dérivation ou de canalisation des eaux de pluie sont également menées afin de protéger les parements restaurés du principal agent érosif des calcaires monumentaux en milieu tropical. En effet, la sensibilité de ces matériaux à la dissolution est exacerbée dans une ambiance climatique très humide où les précipitations, bien que saisonnières, sont très importantes. C'est ainsi que, face à l'érosion accélérée des matériaux exposés, les archéologues sont parfois contraints de réenfouir certains éléments dégagés afin de les conserver (Dominique Michelet, com. pers. 2013).

3.2. Synthèse des interventions sur les structures sélectionnées

La variété et la complexité des interventions recensées en début de chapitre appellent à un effort de synthèse afin de disposer d'un cadre d'analyse relativement robuste. Le contrôle chronologique des structures sélectionnées peut en effet être découpé en différentes phases qui correspondent à des étapes temporelles de leur intervention, ce qui offre une vision plus précise du calendrier des opérations et des structures concernées.

Pour le site de **Becán**, les différentes interventions recensées dans les rapports disponibles sont synthétisées dans le tableau IV-1. Cinq phases d'intervention ont été identifiées – en dehors de l'état initial – correspondant chacune à la fois à une époque, mais aussi globalement à un intervenant particulier (Fig. IV-21). Des premiers dégagements effectués dans les années soixante-dix aux dernières consolidations opérées en 2009, le site de Becán a une trajectoire d'intervention riche et complexe. Mais c'est surtout dans les années quatre-vingt que la plupart des structures sont dégagées et consolidées, et que le site revêt son aspect actuel. Les interventions postérieures sont en effet plutôt assimilables à des opérations de maintenance, même si celles effectuées en 2003-2004 changent radicalement l'aspect – et la microtopographie – de la structure I-A.

Structure	Section	Dégagement	Consolidation	Références
Structure I-A	Façade nord	1992	1992 ; 1993	Bueno *et al.*, 1992 ; 1994
	Chambres façade sud - niveau 1	1982	1982 ; 2003-2004	Piña Chan, 1983 ; Campaña *et al.*, 2004
	Chambres façade sud - niveau 2	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade est	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade ouest	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Tours	2009	2009	Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009
Structure II	Façade nord	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade sud	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade est	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade ouest	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Chambres intérieures	1982	1982 ; 1992	Piña Chan, 1983 ; Bueno *et al.*, 1992
	Temple supérieur	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Panneaux à damiers	1982	1982 ; 2003-2004	Piña Chan, 1983 ; Campaña *et al*., 2004
Structure III	Façade nord	1982	1982 ; 2009	Piña Chan, 1983 ; Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009
	Façade sud	1982	1982 ; 2009	Piña Chan, 1983 ; Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009
	Façade est	1982	1982	Piña Chan, 1983
	Façade ouest	1982	1982 ; 2009	Piña Chan, 1983 ; Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009
	Chambres intérieures	1982	1982 ; 2009	Piña Chan, 1983 ; Suarez Aguilar et Ojeda Mas, 2009
Structure IV	Chambres façade nord - niveau 1	1973	1973	Potter, 1974
	Chambres façade nord - niveau 2	1973	1973 ; 1992 ; 2000-2001	Potter, 1974 ; Bueno *et al*, 1992 ; Campaña *et al.*, 2001
	Façade sud	1982	1982	Potter, 1974
	Façade est	1973	1973	Potter, 1974
	Façade ouest	1973	1973	Potter, 1974
Structure V-A	Façade nord	1974	1974	Messenger, 1975
	Façade sud	1974	1974	Messenger, 1975
	Façade est	1974	1974	Messenger, 1975
	Façade ouest	1974	1974	Messenger, 1975
	Chambres intérieures	1974	1974 ; 1985	Messenger, 1975 ; Bueno et Gutierrez, 1985

Tab. IV-1. Synthèse des interventions recensées dans les rapports disponibles sur le site de Becán.

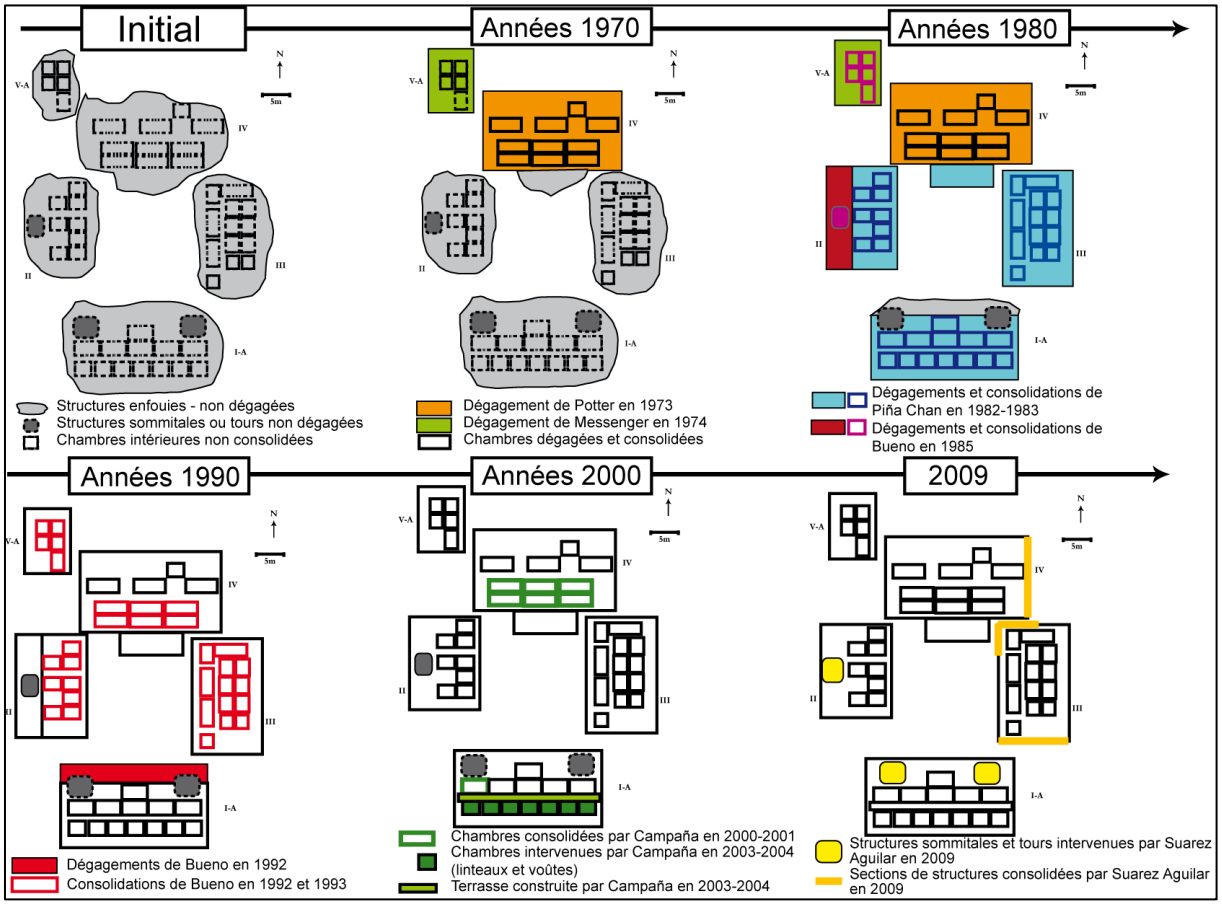


Fig. IV-21. Chronologie synthétique des interventions sur le site de Becán.

En ce qui concerne **Xpuhil**, les opérations reportées sur le tableau IV-2 nous permettent seulement d'identifier, en dehors de l'état initial (Fig. IV-22), deux phases d'intervention (Fig. IV-23). Dans les années soixante-dix et quatre-vingt, la structure I est intensivement intervenue, que ce soit lors des opérations d'urgence des *Brigadas de rescate* de l'INAH, ou lors des interventions ultérieures de Piña Chan. La grande majorité des travaux sur les autres structures sont quant à eux effectués dans les années quatre-vingt-dix, sous la direction de Ricardo Bueno.

Structure	Section	Dégagement	Consolidation	Références
Structure I	Façade nord	1982	1982	Piña Chan et Landa, 1983
	Façade sud	1982	1982	Piña Chan et Landa, 1983
	Façade est	1982	1982	Piña Chan et Landa, 1983
	Façade ouest	1992	1992	Bueno et al., 1992
	Chambres intérieures	1982 ; 1992	1982 ; 1992	Piña Chan et Landa, 1983 ; Bueno *et al.*, 1992
	Tour centrale	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Tours latérales	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
Structure II	Façade nord	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Façade sud	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Façade est	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Façade ouest	1985	1985	Bueno et Gutierrez, 1985
	Chambres intérieures	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
Structure III	Façade nord	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade sud	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade est	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade ouest	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Chambres intérieures	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
Structure IV	Façade nord	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade sud	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade est	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Façade ouest	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992
	Chambres intérieures	1992	1992	Bueno *et al.*, 1992

Tab. IV-2. Synthèse des interventions recensées dans les rapports disponibles sur le site de Xpuhil.

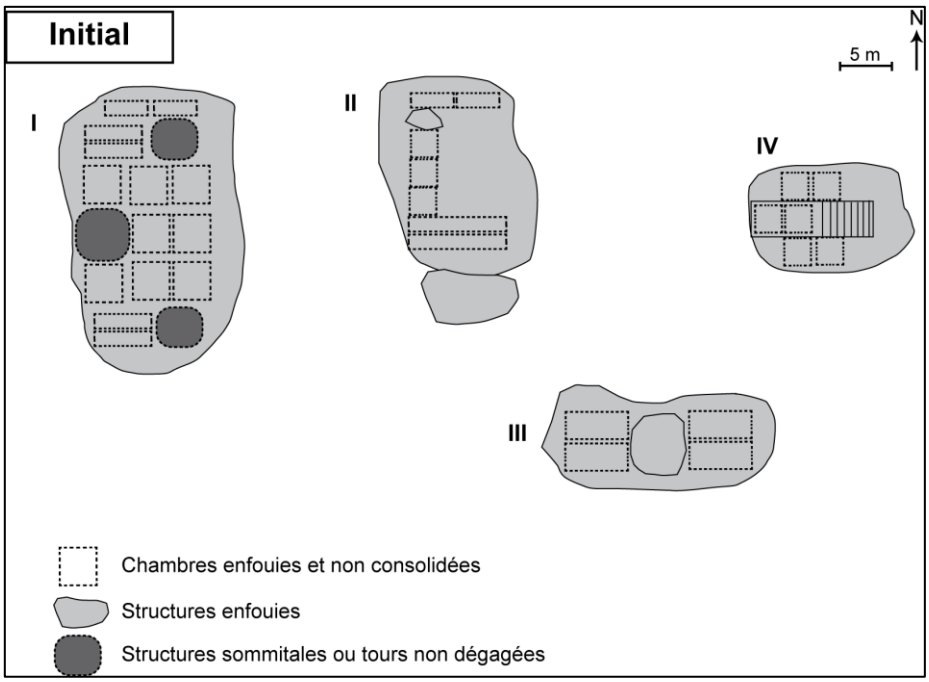


Fig. IV-22. État initial du site de Xpuhil.

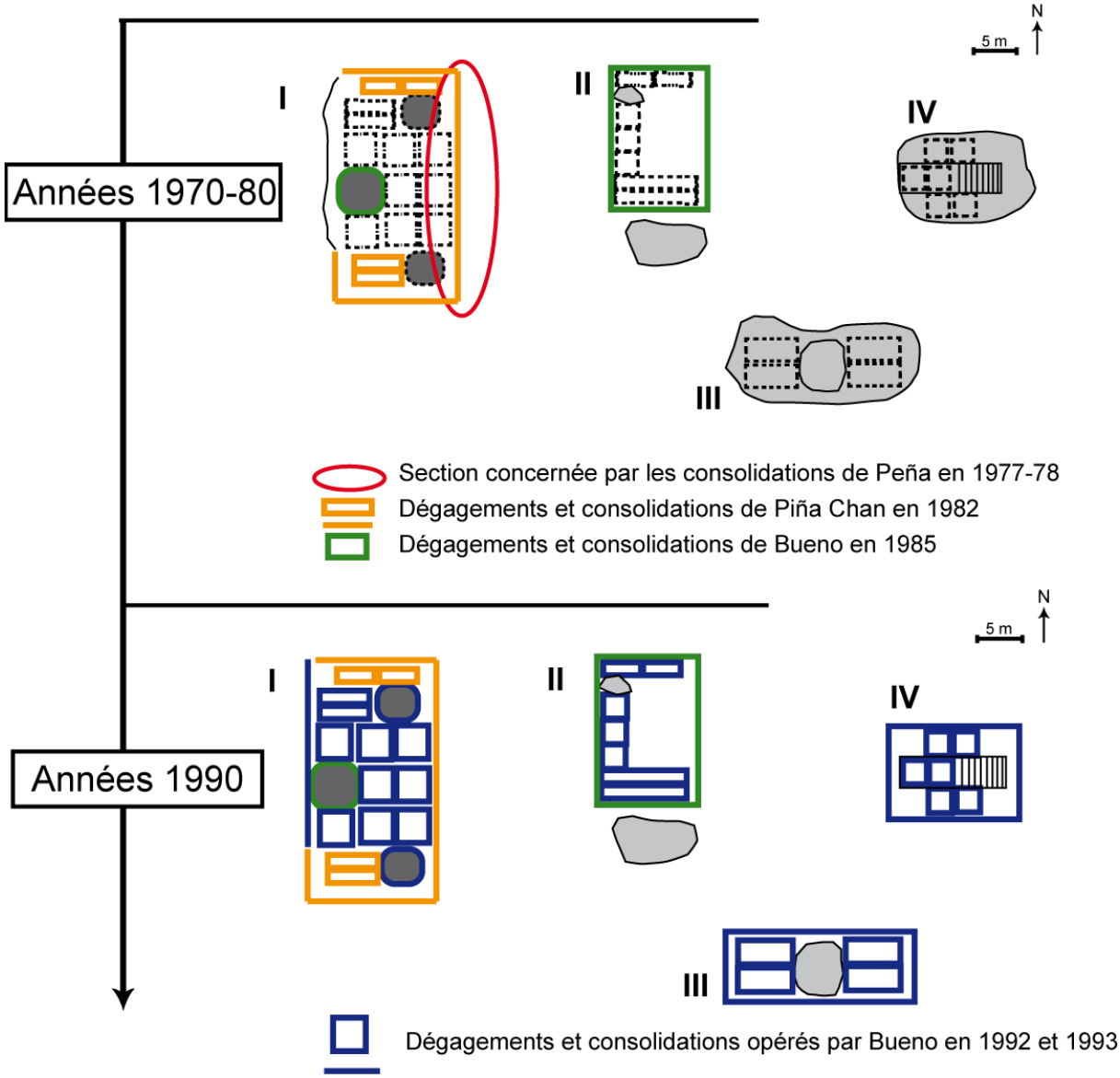


Fig. IV-23. Chronologie synthétique des interventions sur le site de Xpuhil.

La synthèse des interventions sur les sites de Becán et Xpuhil souffre néanmoins d'imprécisions, et ce pour trois raisons : 1°, les rapports consultés à l'*archivo técnico* de l'INAH datent pour la plupart de plus de trente ans, sont dactylographiés à la machine à écrire et parfois difficilement lisibles ; 2°, ces rapports sont bien moins complets et exhaustifs que les rapports plus récents ; 3°, certaines interventions sont constatées sur le terrain, mais aucune source ne les recense. Il semble qu'un certain nombre de ces dernières n'aient pas été consignées dans les rapports disponibles aux archives de l'INAH, et ce pour diverses raisons.

Pour le site éponyme de **Río Bec**, les interventions recensées dans les rapports sont compilées dans le tableau IV-3. A partir de ce dernier, il est possible de distinguer deux principales phases d'intervention : la première, de la redécouverte du site aux dernières opérations de l'INAH dans les années quatre-vingt (Fig. IV-24) ; et la deuxième, qui couvre le projet Río Bec, conduit par le laboratoire « Archéologie des Amériques » de 2002 à 2008-2009 (Fig. IV-25 et IV-26).

Structure	Section	Dégagement	Consolidation	Références
5N2 (Groupe A)	Façade nord	2004 ; 2005	2005 ; 2006 ; 2007	Michelet *et al.,* 2005, 2006, 2007, 2008
	Façade sud	2005	2005	Michelet *et al.,* 2006
	Façade est	2004	2004 ; 2005	Michelet *et al.,* 2005, 2006
	Façade ouest	2007	2007	Michelet *et al.,* 2008
	Chambres intérieures	2002 ; 2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008	2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008	Nondedéo *et al.,* 2002 ; Michelet *et al.,* 2007, 2008, 2009
	Tour nord-est	2004	2004 ; 2005 ; 2006	Michelet *et al.,* 2005, 2006, 2007
	Tour nord-ouest	2005 ; 2008	2004 ; 2005 ; 2007 ; 2008	Michelet *et al.,* 2005, 2006, 2008, 2009
6N1 (Groupe B)	Façade nord	1984	?	Peña Castillo *et al.,* 1984
	Façade sud	1976	1976	Thomas et Campbell, 2008
	Façade est	1973 ; 1984	?	Seuffert, 1974 ; Peña Castillo *et al.,* 1984
	Façade ouest	1976	1976	Thomas et Campbell, 2008
	Panneaux à damiers	1973	1984	Seuffert, 1974 ; Peña Castillo et al., 1984
	Chambres intérieures	1976 ; 1984 ; 2005	1976 ; 1984 ; 2003	Thomas et Campbell, 2008 ; Peña castillo *et al.,* 1984
				Michelet *et al.,* 2004 et 2006
	Tour nord	?	1984 ; 2003	Peña Castillo et al., 1984 ; Michelet *et al.,* 2004
	Tour sud	?	1984 ; 2003	Peña Castillo et al., 1984 ; Michelet et al., 2004
6N2 (Groupe B)	Façade nord	2003 ; 2004	2004	Michelet *et al.,* 2004 et 2005
	Façade sud	2005	2005	Michelet *et al.* , 2006
	Façade est	2005	2005	Michelet *et al.* , 2006
	Façade ouest	2005	2005	Michelet *et al.* , 2006
	Chambres intérieures	2005	2005	Michelet *et al.,* 2006
7N1 (Groupe D)	Façade nord	2006	2006	Michelet *et al.,* 2007
	Façade sud	2003	2003	Michelet *et al.,* 2004
	Façade est	2006	2006	Michelet *et al.,* 2007
	Façade ouest	2006	2006	Michelet *et al.,* 2007
	Chambres intérieures	2006	2006	Michelet *et al.,* 2007

Tab. IV-3. Synthèse des interventions recensées sur le site de Río Bec.

La première phase identifiée sur le site de Río Bec (Fig. IV-24) concerne essentiellement la structure 6N1, emblématique du style architectural éponyme et premier édifice de l'ensemble à être redécouvert en 1973. Cependant, il est probable que des nettoyages ou dégagements mineurs aient été pratiqués sur les ruines à proximité, sans être consignés dans aucun rapport. Quoi qu'il en soit, c'est bien la structure principale du groupe B qui est d'abord intensivement intervenue, les autres édifices restant intégralement en l'état jusqu'au début des années deux-mille et aux premières opérations du projet Río Bec. Si le caractère intensif et répété de ces dernières nous permet de distinguer cette période d'intervention de la précédente, il induit une superposition de la sémiologie qui nécessite la représentation de cette phase sur deux figures chronologiquement successives (Fig. IV-25 et IV-26).

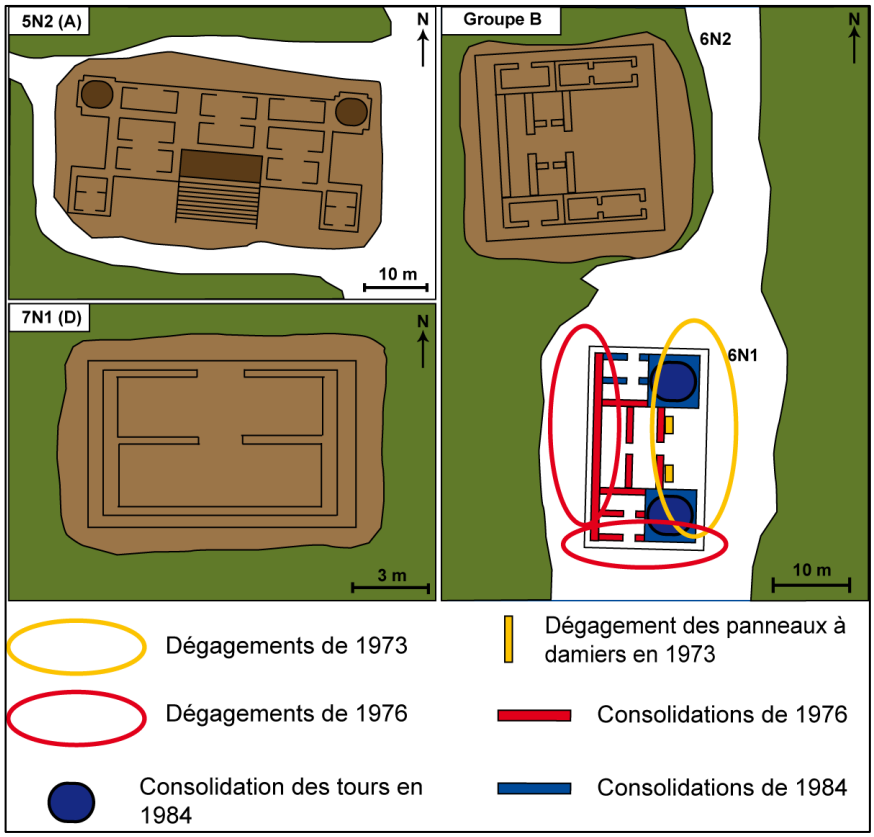


Fig. IV-24. Synthèse de la première phase d'intervention sur le site de Río Bec (1973-1984).

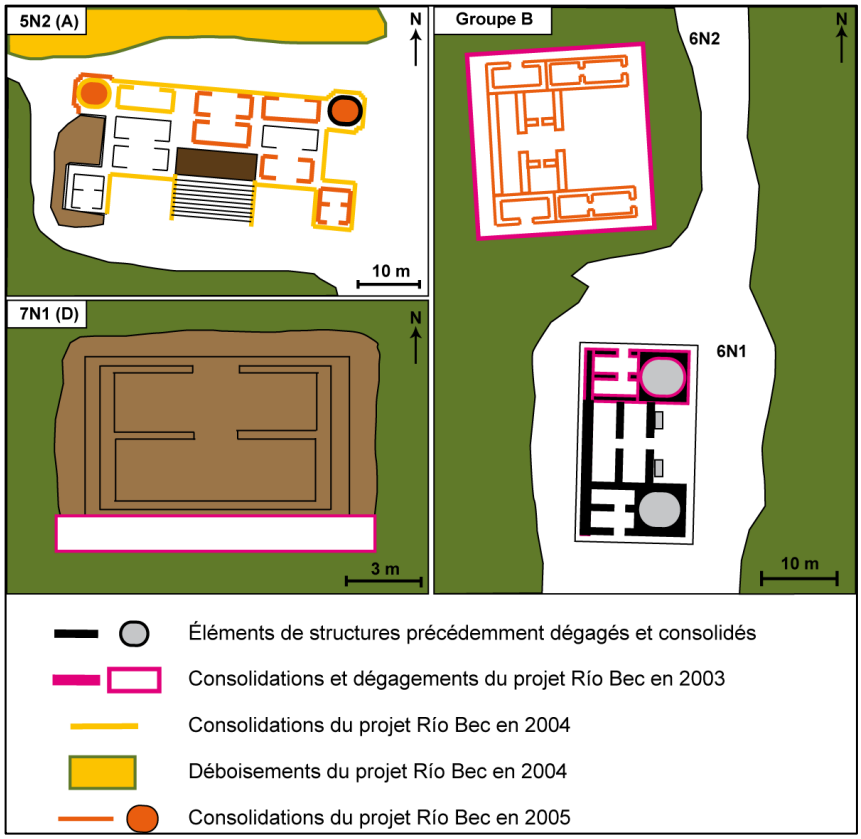


Fig. IV-25. Synthèse des interventions sur le site de Río Bec effectuées dans le cadre du projet éponyme (2002-2005).

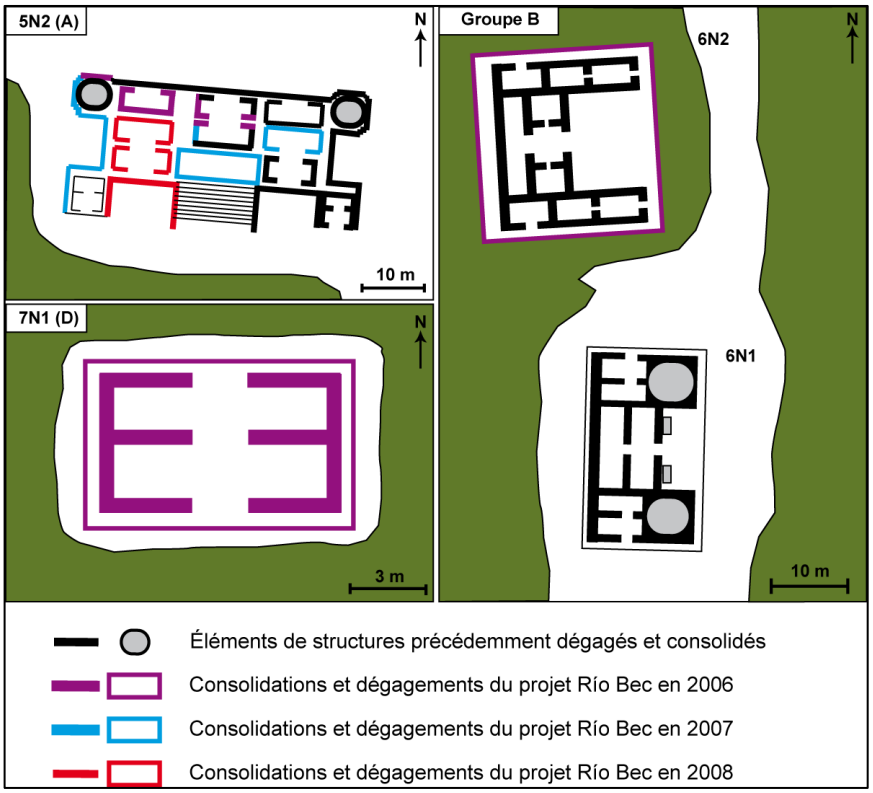


Fig. IV-26. Synthèse des interventions sur le site de Río Bec effectuées dans le cadre du projet éponyme (2006-2008).

La richesse et l'exhaustivité des rapports du projet Río Bec nous a obligé à faire des choix pour spatialiser de manière synthétique les opérations en lien avec notre problématique sans nuire à la lisibilité de leur représentation. En effet, ces rapports nous fournissent également des informations détaillées sur des éléments de structure précis. A titre d'exemple, nous pouvons connaître au corps près la chronologie du dégagement des tours de 5N2, ou encore les sections de parement concernées par telle ou telle consolidation. La plus grande résolution de ce contrôle chronologique sera mise en avant dans les résultats présentés plus loin, et interviendra dans leur discussion. La synthèse proposée ici, quant à elle, cible des opérations facilement identifiables et lisibles, excluant à ce stade les interventions ponctuelles et singulières telles que les nettoyages ou l'application d'enduits sacrificiels. Cette démarche d'anamnèse synthétique nous permet de disposer d'éléments de comparaison entre les différentes structures, pouvant être mis en perspective et servir à l'élaboration d'un cadre d'analyse fondé sur une classification de ces dernières en fonction de leur trajectoire d'intervention.

3.3. Classification des structures étudiées

La synthèse des interventions recensées lors de l'anamnèse des structures étudiées nous permet de mettre en regard la durée d'exposition des édifices depuis leur dégagement avec leur degré d'intervention, afin d'aboutir à une classification pouvant constituer un cadre d'analyse préliminaire. Le croisement de ces deux variables permet en effet de comptabiliser l'influence des facteurs extrinsèques et anthropiques sur les modalités de détérioration des matériaux, et de distinguer les trajectoires d'intervention des structures (Fig. IV-27).

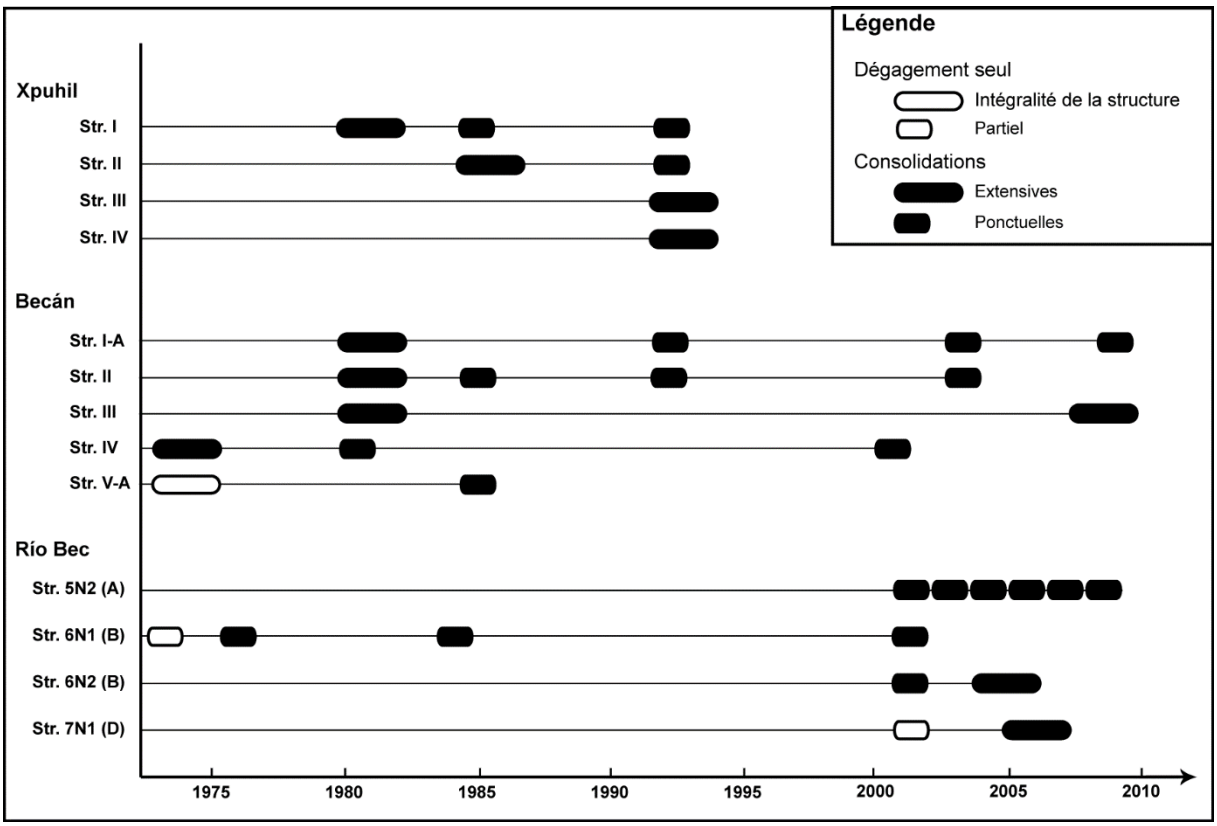


Fig. IV-27. Diagramme de synthèse des trajectoires d'intervention des structures étudiées.

On remarque dans un premier temps que les dégagements seuls – sans consolidations – sont extrêmement rares. En effet, si certaines opérations exploratoires et ponctuelles visent à déterminer l'extension d'une structure ou à déterminer sa fonction, le dégagement d'un édifice à des fins archéologiques s'accompagne systématiquement de consolidations afin de pérenniser l'aspect visuel et l'intégrité structurelle de ce dernier. Ensuite, on note une relative similarité dans les trajectoires d'intervention des structures d'un même site : en dehors de quelques différences minimes, les campagnes d'intervention ont une chronologie globalement homogène sur

chaque site, et seules quelques structures comme V-A de Becán ou 6N1 de Río Bec semblent se distinguer au sein de leur ensemble archéologique. Cependant, la classification proposée – basée sur la durée d'exposition post-dégagement et le degré d'intervention – vient nuancer cette première impression (Fig. IV-28).

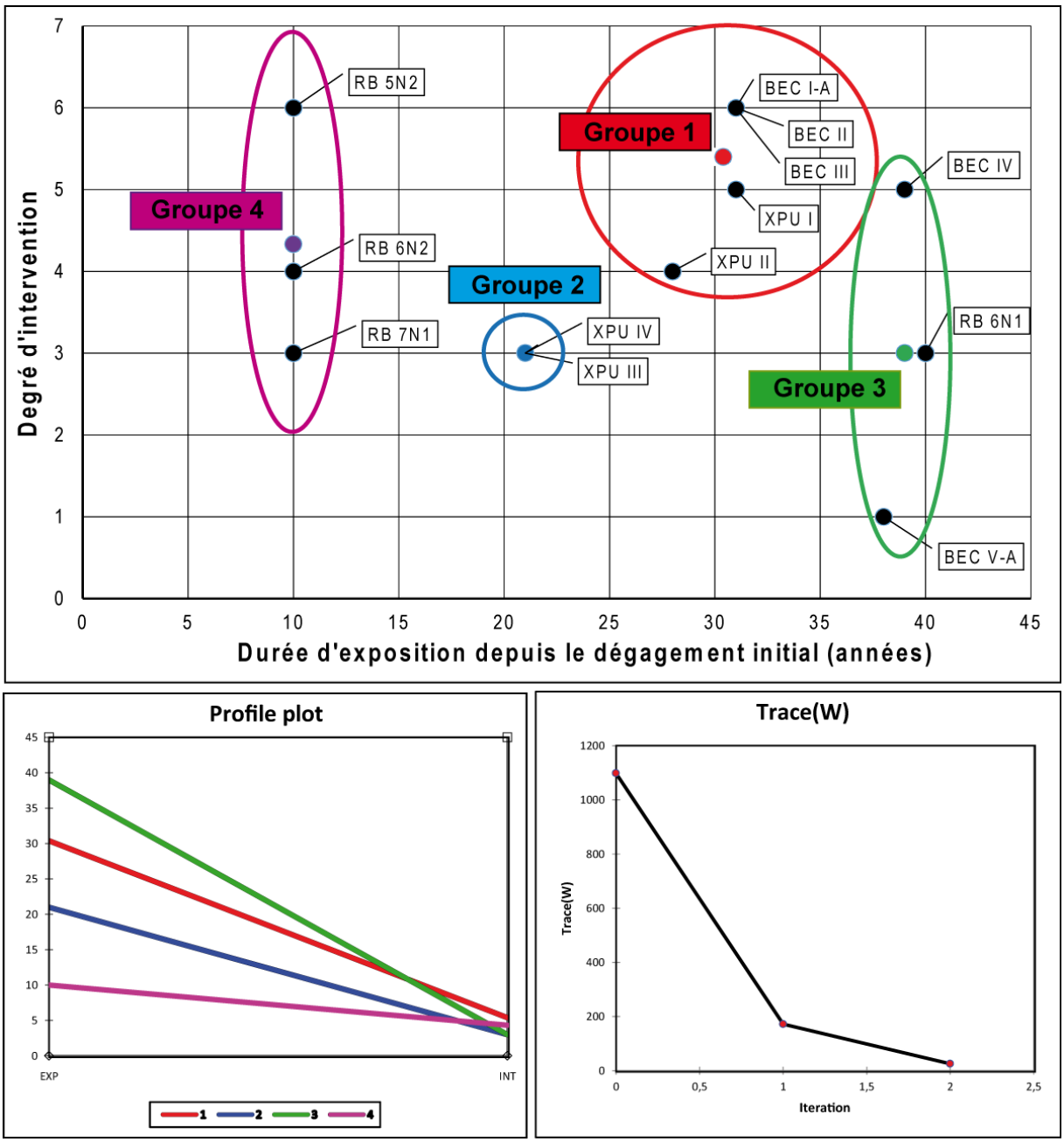


Fig. IV-28. Classification des structures étudiées en fonction de leur durée d'exposition post-dégagement et de leur degré d'intervention : résultat du partitionnement en k-moyennes par le critère Trace(W).

Dans les quatre groupes identifiés, on distingue :

- Le groupe 1, rassemblant les structures I-A, II, III de Becán, et I, II de Xpuhil. Ce groupe se caractérise par un degré d'intervention élevé et une durée d'exposition post-dégagement importante ;
- Le groupe 2, seulement composé des structures III et IV de Xpuhil, qui présentent des valeurs légèrement inférieures à la moyenne pour les deux variables expliquées ;
- Le groupe 3, avec les structures IV et V-A de Becán et 6N1 de Río Bec, qui regroupe des édifices dégagés depuis une quarantaine d'années, intervenus à différents degrés ;
- Le groupe 4, qui englobe les structures 5N2, 6N2 et 7N1 de Río Bec, lesquelles se distinguent par leur dégagement récent et par la variabilité de leur degré d'intervention.

La classification que nous avons élaborée ici est préliminaire et ne constitue qu'une grille d'analyse synthétique permettant la mise en perspective des résultats qui suivront. A ce titre, elle est susceptible d'être nuancée, critiquée, voire remise en question à l'aune de ces derniers. Si la démarche d'anamnèse des structures étudiées est génératrice d'un grand nombre de données informatives et d'un cadre chronologique très utile, leur synthèse et leur mise en commun afin de disposer d'un outil d'interprétation reste complexe. Cette tentative est néanmoins importante pour explorer et construire à partir de ces données, afin que l'effort d'anamnèse ne se réduise pas à un simple inventaire des interventions recensées.

Conclusion du chapitre IV

Les structures archéologiques sélectionnées pour ce travail ont connu des trajectoires d'intervention relativement variées. Depuis leur redécouverte, la durée de leur exposition aux agents bioclimatique oscille entre moins de dix ans et une quarantaine d'années. Les opérations de consolidation et de conservation qui ont concerné le bâti archéologique ont également été pratiquées selon des méthodologies et des temporalités différentes. D'une manière générale, on trouvera sur le site de Becán des structures dégagées depuis plusieurs dizaines d'années ayant fait l'objet d'interventions répétées. Sur le site de Río Bec, les structures s'individualisent surtout par leur dégagement récent, malgré une relative diversité des opérations de consolidation et de conservation. Enfin, à Xpuhil, les édifices ont connu des trajectoires hétérogènes, avec des dégagements à différentes périodes et des degrés d'intervention variés.

L'anamnèse des structures constitue donc un préalable indispensable afin de déterminer l'impact des interventions humaines sur les modalités et les vitesses d'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Au cours de ce chapitre, nous avons non seulement dressé l'inventaire des opérations pratiquées en nous focalisant sur les structures appartenant à notre corpus, mais également spatialisé et synthétisé chronologiquement ces interventions. Enfin, nous avons tenté de construire, à partir de l'ensemble de ces données, une classification des structures sélectionnées afin de disposer d'un outil d'interprétation préliminaire pouvant être utile à la mise en perspective des futurs résultats.

Chapitre V

Caractérisation des facteurs de contrôle

> *« Pris dans son ensemble, le mont est un immense laboratoire naturel, où toutes les forces chimiques et physiques sont à l'œuvre, se servant, pour accomplir leur travail, de cet agent souverain que l'homme n'a pas à sa disposition, le temps. »*
>
> Élisée RECLUS, *Histoire d'une montagne,* 1880.

Seconde étape de ce travail, la caractérisation des facteurs de contrôle s'impose dans une approche holistique s'intéressant au forçage exercé par un élément extérieur, en l'occurrence l'intervention humaine. A l'échelle supérieure, le monument en lui-même possède une morphologie propre, composée de saillies, de rentrants, de « verrous » – formes entravant le ruissellement – qui constituent un système de pentes commandé par le dispositif architectonique. A la pierre monumentale étudiée, support et objet de la dynamique érosive, correspond une multitude de facteurs intrinsèques tels que la composition chimique et minéralogique, la structure, la texture, qui vont commander différents modes de réponse aux stress environnementaux. Les paramètres bioclimatiques, quant à eux, correspondent aux facteurs de contrôle extrinsèques. Les variations hygrothermiques à la surface de la pierre commandent l'action des processus érosifs et conditionnent les régimes de détérioration. L'interaction de ces deux ensembles de facteurs, intrinsèques et extrinsèques, détermine les modalités et les vitesses de détérioration des matériaux de construction, et constitue la base du système sur lequel les interventions humaines viennent agir en tant que forçage anthropique. En ce sens, la caractérisation des facteurs de contrôle est essentielle afin d'identifier et de quantifier l'impact de ces interventions sur l'érosion de la pierre monumentale.

Situés en zone tropicale, où les fortes températures et les importantes précipitations induisent un niveau élevé de stress climatique, et édifiés à partir du substrat calcaire local très vulnérable, les sites archéologiques du secteur Río Bec se caractérisent par un enjeu de conservation élevé. Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux facteurs de contrôle intrinsèques à travers une approche essentiellement descriptive de la morphologie des structures étudiées, des matériaux de construction et de la colonisation biologique, qui s'affinera progressivement vers une caractérisation plus fine à la lumière des analyses pétrographiques. Dans un second temps, nous présenterons les résultats ayant trait aux facteurs de contrôle extrinsèques, et à la caractérisation des ambiances bioclimatiques dans lesquelles s'inscrivent les édifices, avec l'objectif d'identifier les régimes hygrothermiques conditionnant l'agressivité des stress environnementaux sur la pierre monumentale.

1. Caractérisation des facteurs de contrôles intrinsèques

Dans le secteur Río Bec, les bâtisseurs mayas ont extrait les matériaux de construction à proximité des sites archéologiques. En effet, que ce soit pour les pierres taillées (Straulino *et al.,* 2013 ; Michelet *et al.,* 2013 ; Arnauld *et al.,* 2014), la poudre calcaire servant à l'élaboration des mortiers (Gillot, 2014), ou les autres matières lithiques utilisées comme le silex ou la chaille (Michelet *et al.,* 2008b), l'intégralité des matériaux provient de sources locales, parfois situées à moins de 50 m des structures (Fig. V-1).

Les constructeurs originels ont donc utilisé les calcaires locaux, enfouis à faible profondeur sous les leptosols peu épais qui caractérisent la zone (Bautista Zuñiga *et al.* 2005 et 2011) : les encroûtements carbonatés du secteur sont ainsi la source exclusive d'approvisionnement en pierres de taille. Ces croûtes calcaires, aussi appelés *hardpan* ou *duricrust* par les anglophones et *caliche* par les hispanophones, correspondent à des formations secondaires résiduelles s'étant constituées à partir du substrat calcaire, et sont donc susceptibles de comporter un certain nombre de défauts. Cependant, la faible durabilité supposée de ces matériaux était originellement compensée par les Mayas par l'application répétée de couches de stuc qui couvraient l'ensemble des édifices, et permettaient leur décoration avec des peintures colorées.

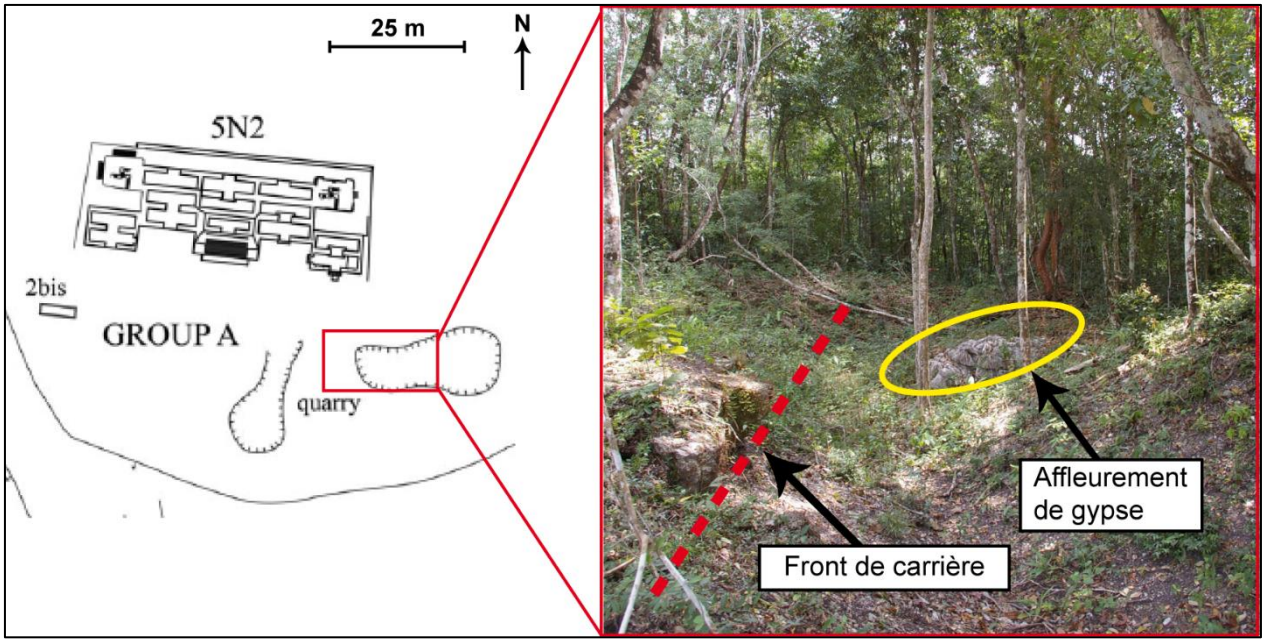


Fig. V-1. Croquis de localisation de la carrière à proximité de 5N2 à Río Bec (modifié d'après Michelet *et al.,* 2013) et aperçu de l'endroit en question.

Les facteurs intrinsèques de la détérioration des calcaires monumentaux du Río Bec ont une place centrale dans notre travail. Afin de les caractériser et de les évaluer, nous adopterons dans un premier temps une approche descriptive, qui s'affinera progressivement sur la base d'analyses pétrographiques détaillées.

1.1. Approche descriptive des matériaux de construction

La plupart des structures étudiées se caractérisent par les aspects architectoniques propres au style Río Bec et par l'uniformité des matériaux de construction employés. Nous procéderons donc, dans cette première approche, à une analyse de la morphologie des structures, à une caractérisation des différents types de matériaux constitutifs des sites archéologiques, puis nous décrirons et identifierons les agents biologiques responsables d'altérations chromatiques sur les parements exposés.

1.1.1. Morphologie des structures : de l'architectonique au système de pentes

L'approche géomorphologique de l'érosion des monuments que nous adoptons ici implique l'assimilation du bâti archéologique à une entité géomorphologique, tel un

ensemble hétérogène de matériaux quasi-exclusivement minéraux dont la morphologie correspond à un système de pentes sur lequel agit une dynamique érosive. Les aspects architectoniques des structures étudiées, relatifs au style architectural développé dans le Río Bec, déterminent donc la spatialité des régimes d'érosion par la configuration du système de pentes associé. Dans le secteur étudié, on retrouve plusieurs configurations de ces systèmes en fonction de l'état de conservation des structures (Fig. V-2). La morphologie des ruines et les héritages architecturaux induisent donc plusieurs modalités de ruissellement, qui se traduisent par une variabilité du régime d'érosion.

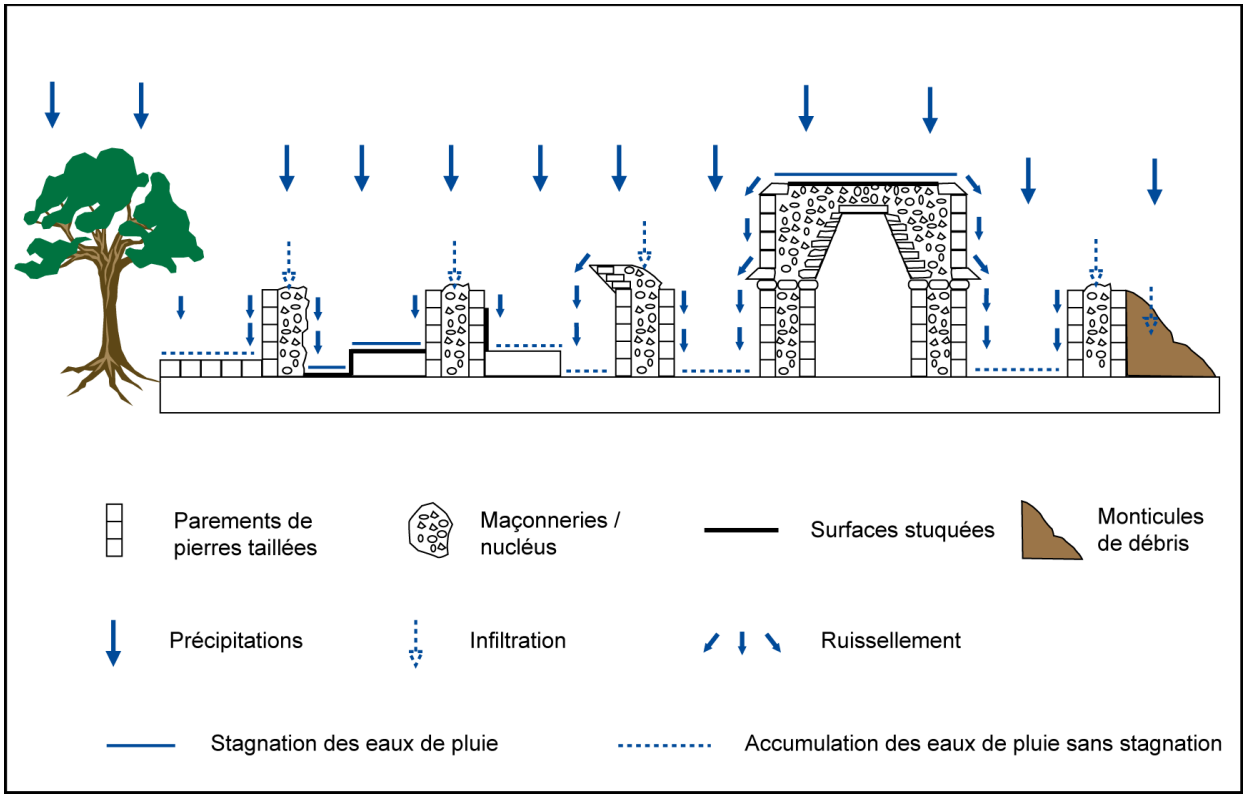


Fig. V-2. Modalités de ruissellement sur une structure hypothétique du Río Bec en coupe transversale, regroupant les cas de figures rencontrés dans le secteur.

Lorsqu'ils subsistent, les parements de pierres taillées impliquent un ruissellement vertical alors que les sections de maçonneries exposées, dont la surface est plus hétérogène et sur lesquelles le remplissage de mortier est dominant, vont favoriser l'infiltration des eaux de pluie. Par ailleurs, les demi-voûtes, parfois reconstruites dans le secteur Río Bec, constituent des saillies dans la morphologie des structures et abritent les parements situés en contrebas. Lorsque les voûtes sont complètes, les pièces sont fermées et les parements de

la chambre sont protégés des précipitations, même si des effets d'infiltration peuvent survenir et que l'engouffrement des vents dans les espaces intérieurs peut supposer l'entrée en jeu de processus d'évacuation de débris issus de la désagrégation granulaire. Les surfaces stuquées, relativement rares mais toujours présentes de manière sporadique sur les parements et les sols des chambres, induisent quant à elles un ruissellement plus rapide et l'accumulation des eaux de pluie avec une stagnation provoquant éventuellement des phénomènes de remontées capillaires. Enfin, si la proximité du couvert forestier limite les apports d'eau de pluie sur les structures et a un effet rétenteur d'humidité ambiante, les précipitations s'infiltrent dans les monticules de débris qui s'accumulent au pied des parois et entravent le ruissellement sur les parements de pierres taillées.

La diversité des cas de figure rencontrés dans le secteur Río Bec nous invite à prendre en compte la morphologie des structures dans l'étude des dynamiques érosives. Qu'ils soient le produit d'héritages architecturaux ou de restaurations récentes, ces cas de figure induisent une variabilité non négligeable de l'action des processus érosifs par des effets microtopographiques d'abri ou d'exposition de différentes sections de structures ne présentant pas les mêmes matériaux, ni parfois les mêmes surfaces.

1.1.2. Description macroscopique des matériaux

A l'échelle macroscopique, les matériaux de construction du secteur Río Bec sont globalement très homogènes. D'une part, le contexte géologique de la région n'offre à la disposition des bâtisseurs qu'un ensemble de calcaires ayant globalement évolué dans un environnement similaire, sans événements tectoniques majeurs pouvant mettre à jour d'autres types de matériaux. D'autre part, les processus diagénétiques à l'œuvre dans l'altération du substrat calcaire (percolation, migration des carbonates) n'engendrent pas de modifications radicales de l'aspect de la roche pouvant être distinguées visuellement. Les blocs de maçonnerie constitutifs des parements des sites étudiés sont ainsi d'une grande homogénéité visuelle, de couleur grisâtre à beigeâtre, d'une texture apparente plus ou moins crayeuse selon leur état de conservation (Fig. V-3).

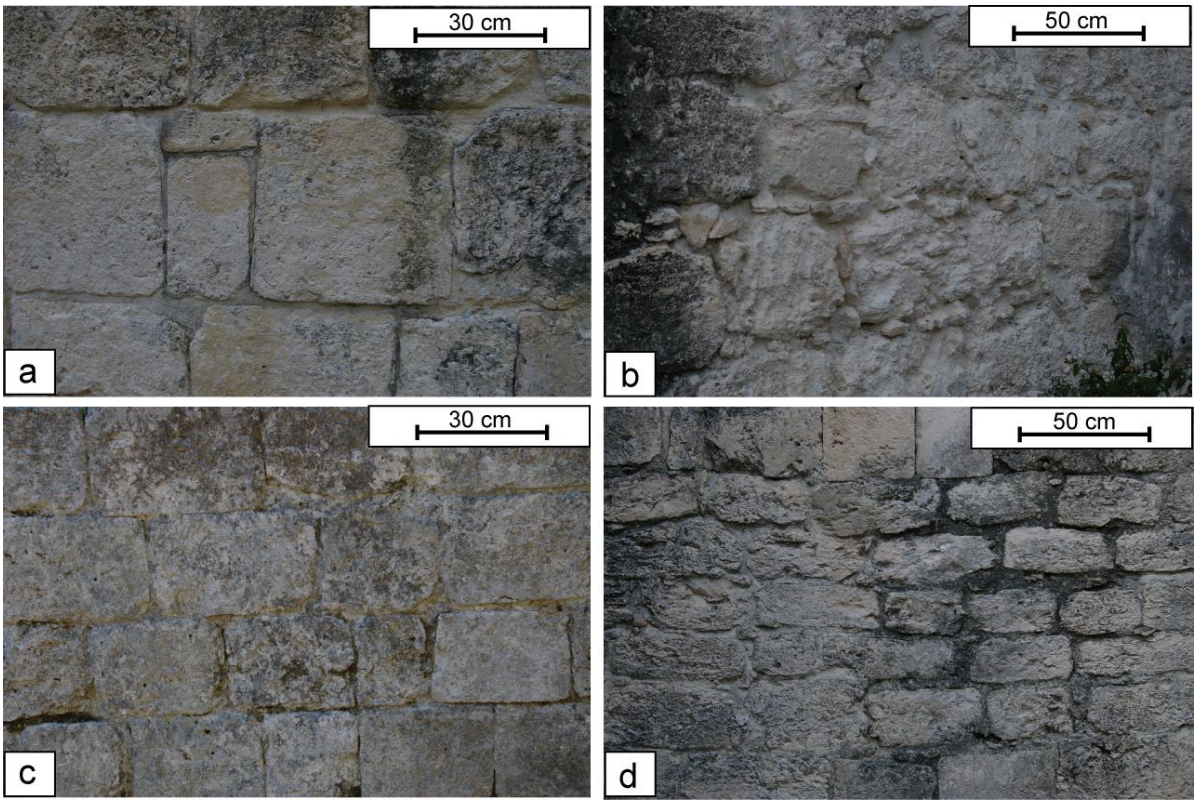


Fig. V-3. Homogénéité macroscopique des matériaux de construction dans le secteur Río Bec sur le site éponyme (a et b), à Becán (c), et à Xpuhil (d).

Dans le Río Bec, les murs sont constitués d'un noyau de tout-venant (ou nucléus), consolidé par du mortier, enserré entre deux parements de pierre de taille (Fig. V-4). Le module est variable mais généralement assez grand avec des carrés de 40 cm de côté, souvent plus petit sur les parements extérieurs. La qualité des pierres de taille est également variable, avec une nette distinction des blocs des parements extérieurs, plus tendres, permettant leur ouvrabilité pour les éléments iconographiques sculptés (Arnauld *et al.,* 2014). Dans cette architecture développée à Río Bec, la qualité des mortiers commande l'intégrité et la longévité des murs, et, comme le suggère Gillot (2014), le fait que les noyaux de maçonnerie soient aujourd'hui majoritairement mieux conservés que les parements de pierres taillées indique que les constructeurs mayas leur accordaient une attention particulière. Cependant, outre leur présence importante dans les nucléus, les mortiers sont quasiment absents des parements latéraux de la région, dans lesquels le joint sec prédomine entre les blocs de pierre de taille. En revanche, il semble que le mortier ait été largement utilisé dans les restaurations contemporaines, avec parfois de la blocaille insérée entre les pierres taillées (Fig. V-3b).

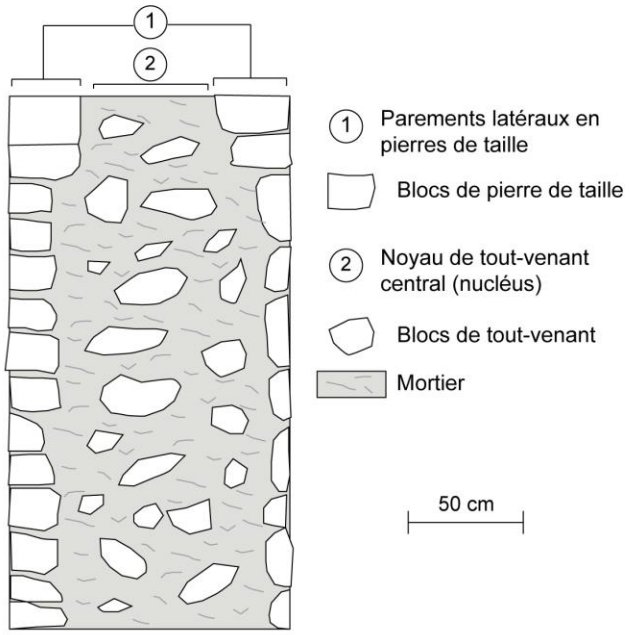


Fig. V-4. Coupe transversale schématique des murs de maçonnerie du secteur Río Bec.

Les paramètres climatiques déterminés par le climat tropical en vigueur dans le Río Bec, couplés à la capacité bioréceptive des matériaux carbonatés, favorisent également la croissance et la subsistance d'une large variété de micro-organismes à la surface de la pierre. En effet, sur l'intégralité des structures étudiées, les parements sont colonisés par différents types d'organismes.

1.1.3. Altérations chromatiques et biofilms épilithiques

Parmi ces recouvrements biologiques, on trouve des biofilms noirs dominés par les cyanobactéries coccoïdes *Gloeocapsa sp.* D'épaisseur variable en fonction de la rugosité superficielle des matériaux et d'aspect poussiéreux à visqueux selon leur teneur en eau, ils semblent fermement accrochés aux parements des structures qu'ils recouvrent parfois entièrement, ce qui leur confère une coloration d'ensemble grisâtre à noirâtre (Fig. V-5a). Outre ces biofilms noirs, largement majoritaires dans les recouvrements biologiques du secteur Río Bec, les patines rosâtres sont le second biofilm le plus présent sur les structures sélectionnées (Fig. V-5b). Correspondant à l'algue verte *Trentepohlia sp.* – pourtant de couleur rose à rouge vif – on retrouve souvent ces patines colonisées par des lichens blancs (Fig. V-5d) et parfois par des mousses (Fig. V-5c), ces deux derniers complétant la liste des organismes colonisateurs majoritaires dans le secteur. Ces patines rosâtres sont de fine

épaisseur, généralement inférieure à 2 mm, et forment des taches dispersées recouvrant les structures de manière sporadique. Les lichens blancs colonisant ces biofilms algaires sont généralement de forme circulaire mais se présentent parfois sous la forme de petites boules de texture crayeuse et pulvérulente.

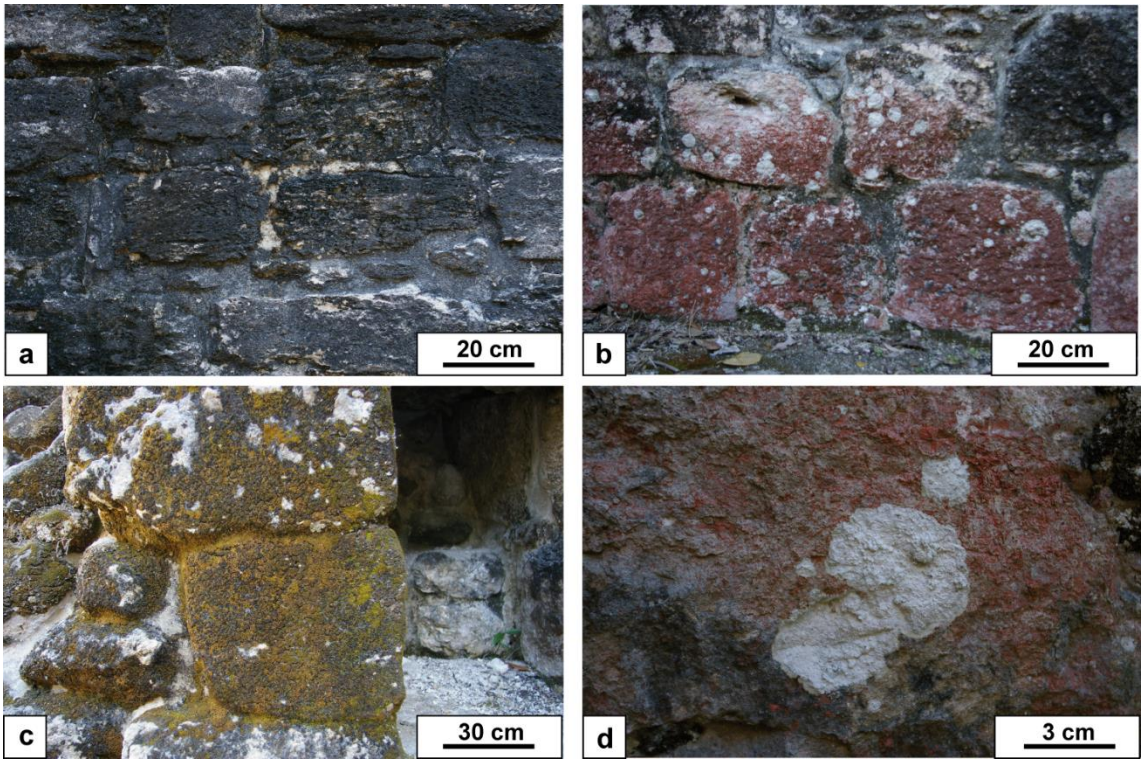


Fig. V-5. Organismes colonisateurs sur les structures du secteur Río Bec. Biofilms cyanobactériens (a), algaires *Trentepohlia sp.* (b), muscinaux (c) et lichéniques (d).

Outre les altérations chromatiques et la modification de l'aspect visuel des structures, la colonisation biologique a une implication large dans les modalités et vitesses de détérioration de la pierre monumentale, laquelle sera discutée à la lumière des résultats de diagnostic de la dynamique érosive.

1.2. Analyses pétrographiques et évaluation de la durabilité-vulnérabilité des matériaux

En tant que support de la dynamique érosive, les matériaux employés dans les sites archéologiques étudiés nécessitent une caractérisation fine de leurs propriétés physico-chimiques afin d'évaluer leur durabilité et de déterminer les facteurs contribuant à leur vulnérabilité vis-à-vis des agressions bioclimatiques. Pour ce faire, la composition chimique

de quatre échantillons représentatifs a été analysée par diffraction des rayons X, les matériaux ont été observés par microscopie électronique à balayage, et une dizaine d'échantillons prélevés *in situ* ont été étudiés en lames minces.

1.2.1. Composition chimique des matériaux

Si les matériaux calcaires utilisés dans le Río Bec sont très homogènes, à la fois visuellement et en raison de leur provenance locale, une analyse de leur composition chimique s'avère nécessaire afin d'identifier d'autres éléments chimiques que la calcite, potentiellement présents dans ces matériaux. L'analyse par diffraction des rayons X (Fig. V-6) a concerné deux échantillons du site éponyme (RB-01, une pierre de parement de la structure 5N2 en bon état, et RB-10, une pierre de parement détériorée de la structure 6N2), ainsi qu'un échantillon de mortier prélevé sur le site de Becán (BEC-10B), et celui d'une pierre de parement de Xpuhil (XPU-06).

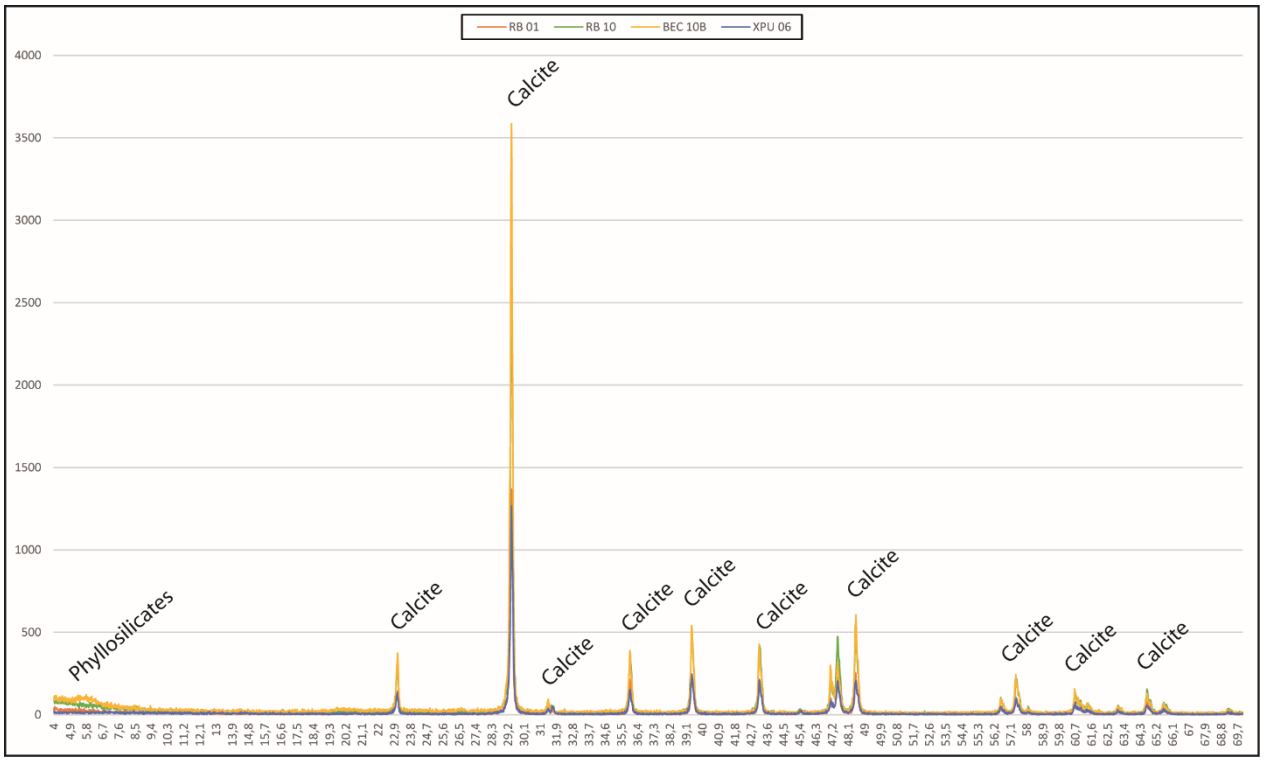


Fig. V-6. Diffractogramme des analyses de cristallographie par rayons X sur les quatre échantillons de matériaux de construction retenus.

Sans grande surprise, les pics observés sur le diffractogramme sont quasi-exclusivement associés à la calcite. Cependant, les premiers indiquent la présence de phyllosilicates, une large famille d'argiles construites par empilement de couches tétraédriques, et dont l'interaction des feuillets expansifs avec les molécules d'eau a été identifiée comme le principal mécanisme à l'origine des desquamations en plaques sur la « Pierre du Midi » par Berthonneau (2013). Compte tenu du contexte secondaire et résiduel de croûte calcaire dans lequel s'inscrivent les présents travaux, les argiles identifiées appartiennent vraisemblablement à la famille des smectites, notamment la montmorillonite, abondante dans les sols modérément altérés et mal drainés (Konta, 2005 et 2009). On retrouve la plus grande proportion de phyllosilicates dans l'échantillon BEC-10B, correspondant un prélèvement de mortier, et dans l'échantillon RB-10, correspondant à une pierre de parement détériorée. En effet, les mortiers sont susceptibles de comporter des additifs qui induisent une fraction granulométrique argileuse plus importante et dont la provenance est moins locale, comme le suggère l'identification de phytolithes et de pouzzolanes dans les mortiers du secteur Río Bec (Gillot, 2014). Par ailleurs, la reprécipitation des minéraux altérés en contexte pédogénétique est cohérente avec sa représentation légèrement supérieure dans un échantillon de roche détériorée (RB-10).

Au total, l'identification des phyllosilicates nous offre des éléments de discussion relatifs à l'évaluation des facteurs de vulnérabilité de la roche, en raison du potentiel de détérioration mécanique par humectation et dessiccation lié à leur présence. En revanche, l'analyse de la composition chimique des prélèvements ne nous permet pas de disposer d'une caractérisation précise des matériaux de construction utilisés, essentiellement composés de calcite et d'une proportion d'argiles extrêmement faible pour ne pas dire anecdotique. En ce sens, l'analyse des propriétés pétrographiques des matériaux semble s'imposer afin d'aboutir à une caractérisation fine des matériaux et à la distinction des facteurs de durabilité ou de vulnérabilité associés.

1.2.2. Variabilité des faciès carbonatés identifiés

L'observation en lames minces des prélèvements effectués dans le secteur Río Bec, dont le lecteur trouvera le détail des observations en annexe de ce manuscrit (Annexe I, p. 351), a mis en lumière une forte variabilité de faciès carbonatés au sein d'un ensemble de

matériaux dont l'homogénéité est suggérée par le contexte géologique et l'aspect visuel. Cette variabilité peut se résumer à un gradient de diagénèse entre deux faciès types bien identifiés : un faciès typique des croûtes calcaires, que nous appellerons *caliche* en lien avec sa dénomination locale dans le Yucatán, et un faciès laguno-continental dolomitique.

Faciès caliche

Le premier faciès carbonaté identifié montre une texture mixte tout à fait caractéristique des encroûtements calcaires. Ce faciès se caractérise par la présence d'agrégats circulaires qui correspondent à des oncolithes (Fig. V-7) ; on peut alors parler de structure oncolithique. Ces agrégats, assimilables à des stromatolithes – roches d'origine cyanobactérienne – roulés en boules et qui témoignent d'une cimentation secondaire, peuvent être laminés ou pseudo-laminés, voire homogènes (on les qualifiera alors de « micritiques »).

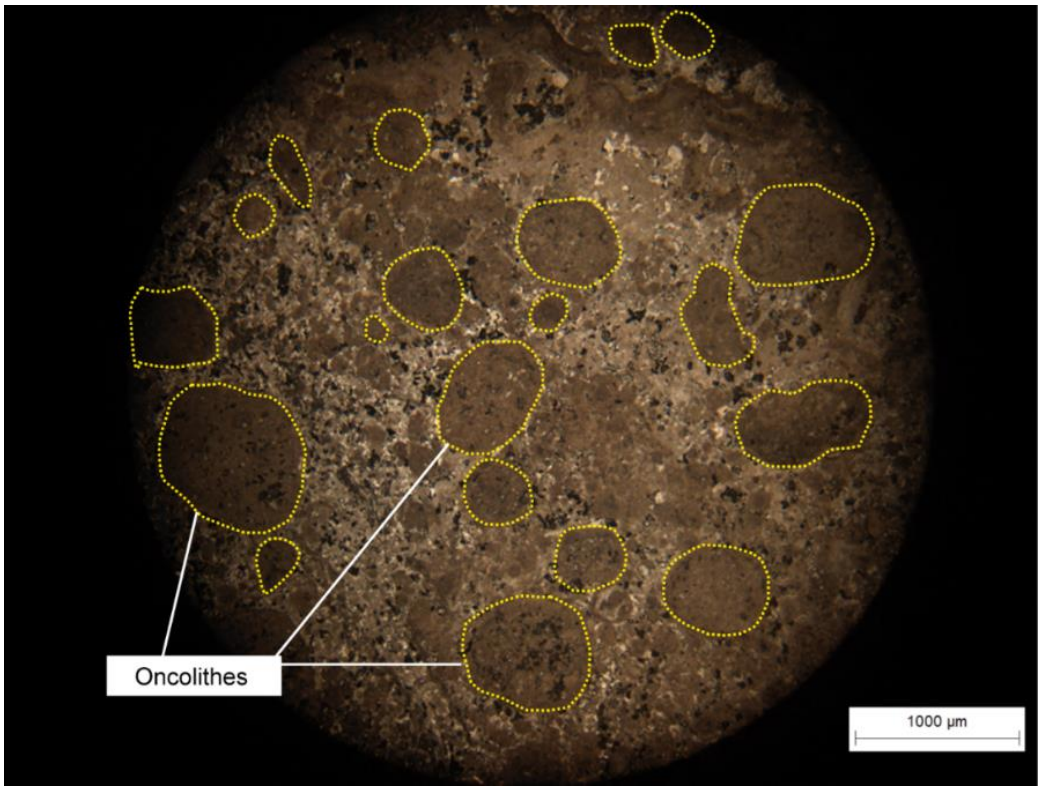


Fig. V-7. Vue d'ensemble de l'échantillon XPU-06 observé en lumière naturelle, montrant le faciès caliche et la diversité des oncolithes.

Les oncolithes, de taille variable et de forme circulaire à elliptique, se retrouvent insérés de façon aléatoire dans une matrice micritique finement cristallisée. Cette dernière est parcourue par une porosité tubulaire, notamment à la périphérie de ces agrégats hérités (Fig. V-8).

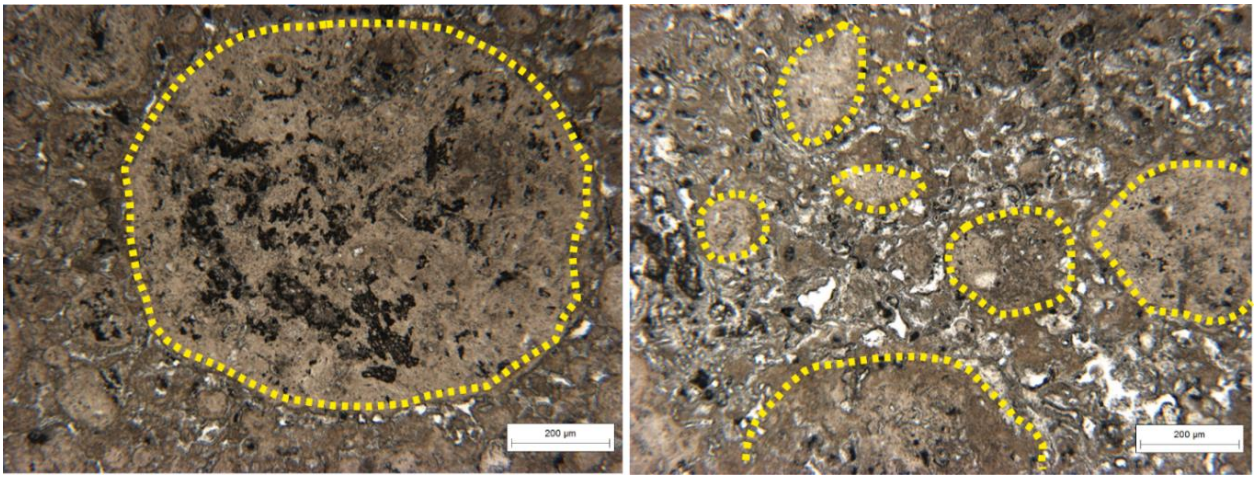


Fig. V-8. Oncolithes (cerclés de jaune) observés en lumière naturelle dans l'échantillon XPU-09, et porosité tubulaire se développant de manière préférentielle autour des agrégats.

On retrouve le faciès *caliche* dans un grand nombre de lames minces, même s'il s'agit essentiellement les prélèvements réalisés sur le site de Xpuhil. C'est un faciès typique des encroûtements carbonatés où l'on retrouve des caractéristiques liées aux processus pédogénétiques qui, pouvant être associées à des facteurs de durabilité ou de vulnérabilité, seront abordées plus loin.

Faciès laguno-continental dolomitique

Le faciès laguno-continental dolomitique correspond au deuxième faciès identifié lors de l'observation en lames minces des échantillons de matériaux prélevés dans les sites archéologiques du Río Bec. Ce faciès présente une texture en mosaïque, bien cristallisée, avec une alternance de niveaux micritiques correspondant à une boue de micrite évaporitique, et de microsparite (Fig. V-9). On retrouve également des composants similaires à ceux du faciès proche des croûtes calcaires, notamment des oncolithes, bien que plus rares, et des grains de calcite isolés, parfois altérés, en proportion plus importante.

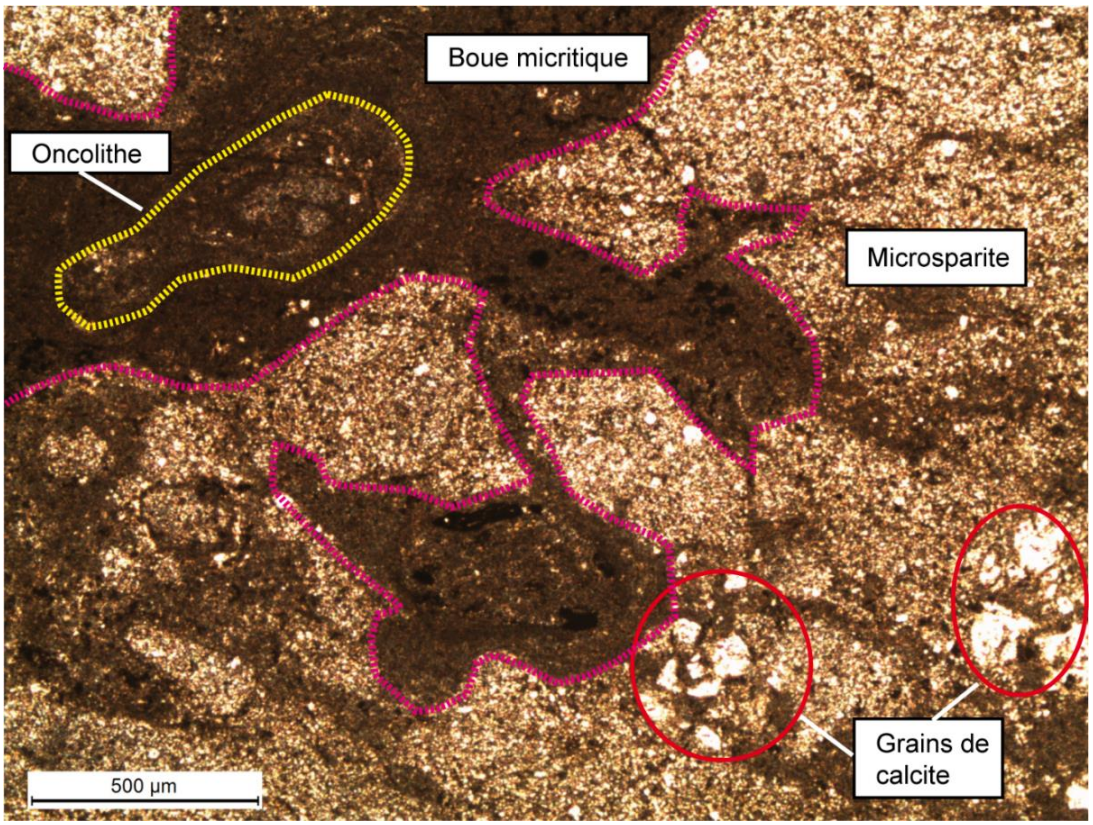


Fig. V-9. Structure d'ensemble de l'échantillon BEC-06, observé en lumière naturelle, montrant la structure en mosaïque avec l'alternance de niveaux micritiques et microsparitiques.

Les niveaux de ce faciès se structurent globalement en mosaïque, ou plus rarement de façon laminaire, avec des trames et des fissures remplies de dolosparite bien cristallisée (Fig. V-10), qui témoignent de l'action de processus de dessiccation et de détérioration mécanique.

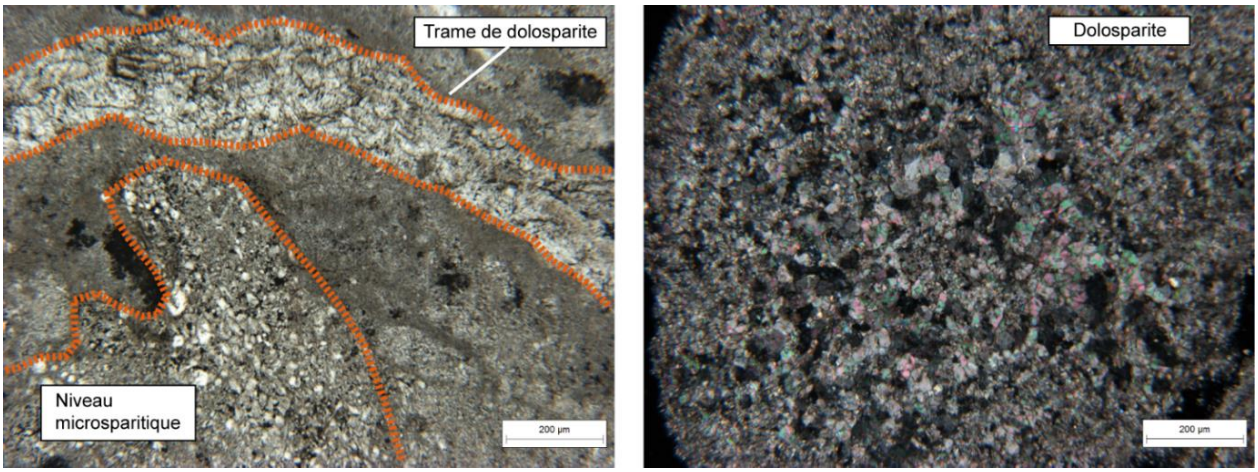


Fig. V-10. Trames de dolosparite observées en lumière naturelle (à gauche) et masse de dolosparite observées en lumière polarisée (à droite) dans l'échantillon BEC-01.

Des oncolithes sont toujours présents, ainsi que des grains de calcite altérés (Fig. V-9) et quelques sables et argiles (Fig. V-11), correspondant probablement aux phyllosilicates identifiés par diffraction des rayons X. Au total, il s'agit d'un faciès évaporitique avec peu de pollution détritique, finalement assez différent des croûtes calcaires notamment en termes de structure, bien plus finement cristallisée, et de porosité, bien inférieure au faciès *caliche*.

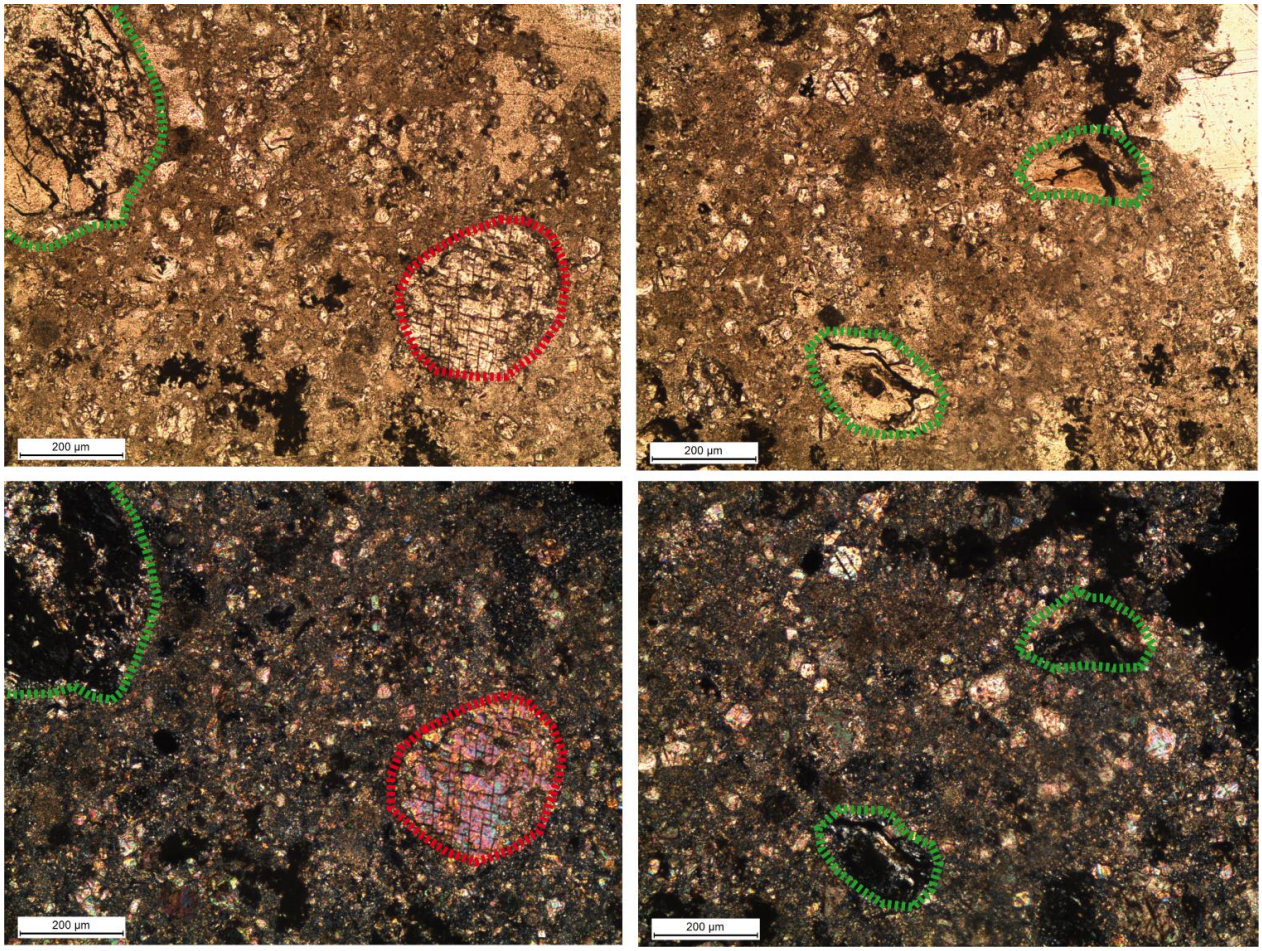


Fig. V-11. Argiles (cerclées de vert) et grains de calcite (cerclés de rouge) observés en lumière naturelle (en haut) et en lumière polarisée (en bas) dans l'échantillon RB-01.

Les faciès carbonatés identifiés témoignent d'un degré de diagenèse différencié et sont associés à des caractéristiques pétrophysiques relativement différentes en termes de structure et de composition. Le tableau V-1 résume les observations en indiquant pour chaque échantillon le type de structure et la proportion des textures identifiées, ainsi que les composants retrouvés.

Échantillon	Localisation	Structure	Texture maj. (abondance %)	Texture sec. (abondance %)	Composants
XPU-01	St. I / Ch. L	Mosaïque	Dolosparite (50%)	Micritique (50%)	Oncolithes, grains et amas
XPU-04	St. I / Ch. H	Laminaire	Micrite (60%)	Dolosparite (40%)	Oncolithes (rares)
XPU-06	St. II / Ch. B	Oncolithique	Micrite (quasi 100%)	Zones sparitiques	Oncolithes (nbx)
BEC-01	Mur V-A	Laminaire	Micrite (>80%)	Microsparite (<20%)	Oncolithes (rares), grains
BEC-06	Mur V-A	Mosaïque	Microsparite (50%)	Micrite (50%)	Oncolithes, grains et amas
BEC-10B	St. I-A	Chaotique	Microsparite (70%)	Micrite (30%)	Argiles, nbx composants
RB-01	5N2 / Ch. G	Homogène	Micrite (85%)	Dolosparite (15%)	rares argiles
RB-10	6N2 / Ch. D	Homogène	Micrite (90%)	Dolosparite (10%)	grains isolés

Tab. V-1. Tableau récapitulatif des observations en lames minces sur les échantillons prélevés.

On remarque la diversité des matériaux, allant de structures homogènes, oncolithiques ou laminaires, essentiellement dominées par une matrice de texture micritique, à des structures en mosaïque, caractérisées par une abondance des textures microsparitiques et dolosparitiques. Si la granulométrie des éléments carbonatés constitutifs de ces matériaux permet de les discriminer, elle est également susceptible de conditionner différents modes de réponse aux stress climatiques. En outre, la présence de composants tels que les argiles ou les grains de calcite isolés peut également induire des comportements mécaniques variables au sein de la roche. Toutefois, sur la base des observations en lames minces et des données du tableau V-1, il semble qu'aucune des lames minces observées ne présente exclusivement tel ou tel faciès, mais plutôt un gradient du faciès *caliche* au faciès laguno-continental (Fig. V-12).

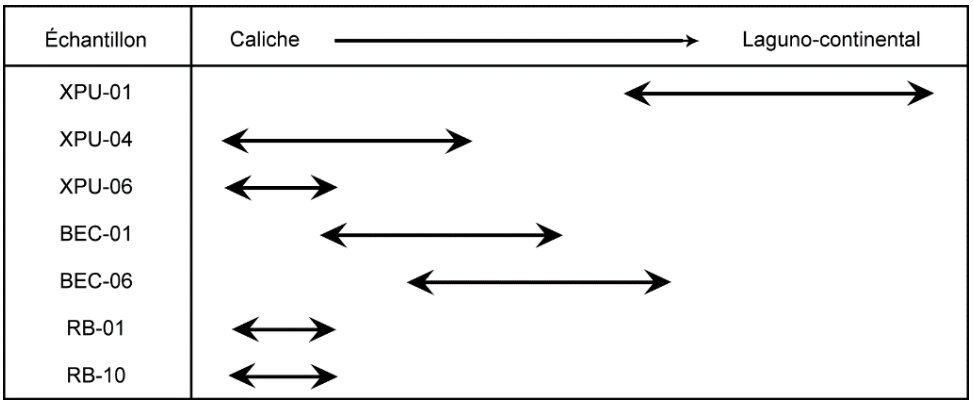


Fig. V-12. Variabilité des faciès carbonatés dans les échantillons observés en lames minces.

Si dans le site éponyme de Río Bec les échantillons observés présentent un faciès globalement plus proche de la croûte calcaire, les analyses montrent des structures plus contrastées dans les autres sites. De même, la proportion des caractéristiques

pétrophysiques associées à tel ou tel des deux faciès est largement plus variable dans les échantillons provenant de ces derniers. L'agencement de ces structures au sein des matériaux de construction va donc conditionner des réponses différentes aux stress bioclimatiques et une variabilité des modalités et de l'efficacité des processus érosifs, en lien avec les facteurs de durabilité et de vulnérabilité induits par les caractéristiques des deux faciès.

1.2.3. Porosité des matériaux de construction

Malgré la variabilité précédemment soulignée, la plupart des échantillons présentent les mêmes types de porosité. Microporosité au sein des matrices micritiques, macropores en lieu et place des oncolithes qui ont chuté ou ont été évidés, porosité tubulaire à la périphérie des agrégats, se retrouvent dans l'intégralité des lames, quel que soit leur structure, la texture dominante, ou le faciès auquel nous les rattachons. Afin d'avoir une lecture plus fine de la porosité de ces matériaux, des analyses quantitatives ont été menées, et certaines variables ont été extraites du jeu de données obtenu (Fig. V-13) : la surface des pores identifiés, leur périmètre, leur diamètre moyen, et leur coefficient d'arrondi.

En ce qui concerne la surface des pores identifiés, les échantillons paraissent relativement similaires et les données ne semblent pas permettre de les discriminer. En revanche, les échantillons BEC-06, RB-01 et RB-10 semblent se caractériser par des périmètres de pores plus élevés. Au niveau de la morphologie des pores, on remarque une différence très nette entre BEC-01 et les autres échantillons. Le diamètre moyen particulièrement élevé est corrélé avec un faible coefficient d'arrondi, et inversement pour les trois autres échantillons, ce qui indique la présence de trames ou de fissures assez importantes dans BEC-01, et une dominance de porosité cavitaire dans BEC-06, RB-01 et RB-10. Cette dernière résulterait a priori de l'évidement ou de la chute d'oncolithes, en raison des valeurs de périmètre des pores, plus élevées, susceptibles de correspondre à des macropores.

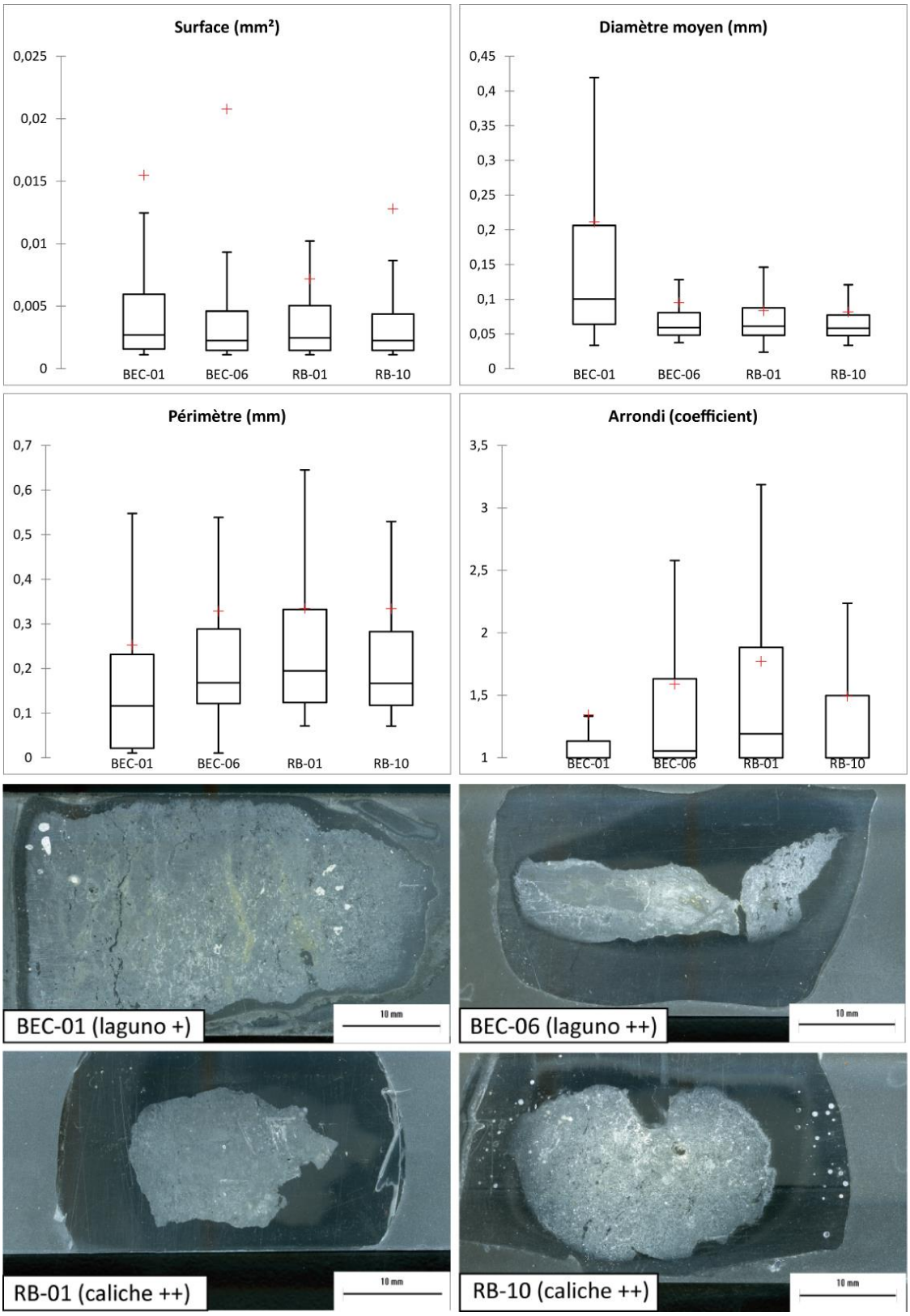


Fig. V-13. Analyses quantitatives de porosité par imagerie informatisée sur les scans figurant au bas de la figure (les « + » indiquent vers quel faciès tend l'échantillon).

Étonnamment, si l'on se réfère au tableau V-1 résumant les principales caractéristiques des échantillons observés en lames minces, c'est BEC-06 qui aurait dû s'individualiser en raison de la proportion égale des textures micritiques et microsparitiques identifiées dans la lame. Pourtant, c'est BEC-01, très similaire en termes de structure aux prélèvements de Río Bec, qui présente des caractéristiques de porosité particulières. Ce constat nous amène à être prudents quant à l'assimilation de critères de vulnérabilité relatifs à la porosité à une structure particulière.

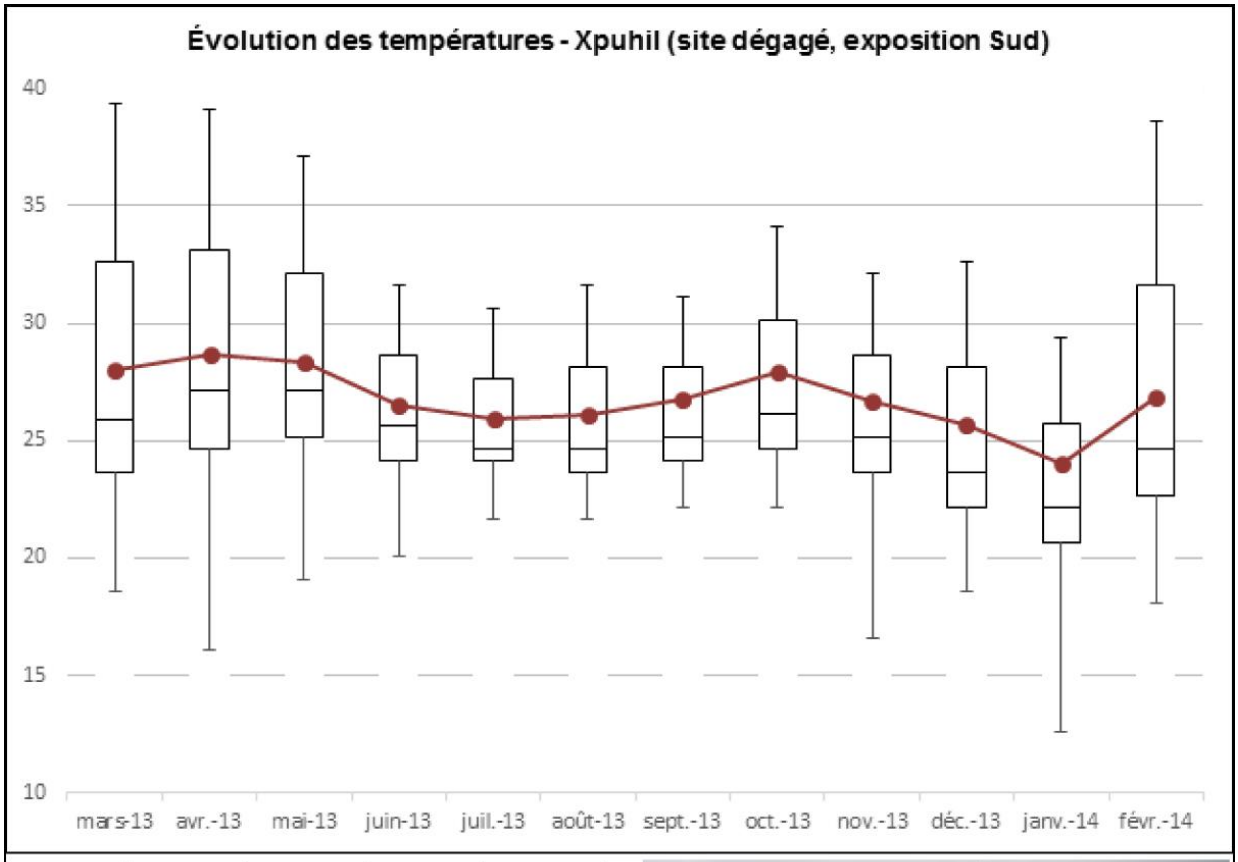
2. Caractérisation des facteurs de contrôle extrinsèques

La température et l'humidité définissent les ambiances climatiques dans lesquelles évoluent les matériaux de construction et conditionnent l'agressivité des stress environnementaux qui affectent l'épiderme rocheux. Dans une large mesure, ces paramètres sont également susceptibles de favoriser la croissance et la subsistance d'une grande variété de micro-organismes à la surface de la pierre. Afin de caractériser ces facteurs de contrôle extrinsèques de l'érosion des matériaux de construction, la mesure des paramètres hygrothermiques a été effectuée à l'aide de capteurs de monitoring climatique iButtons, à deux échelles. Une mesure longue sur une année entière a permis la caractérisation d'une ambiance climatique générale, de la saisonnalité des paramètres climatiques, ainsi que de la variabilité des amplitudes journalières au cours de l'année. Une mesure courte sur une semaine, a permis quant à elle d'acquérir une résolution de données plus fine afin d'aller plus loin dans l'identification de variations intra-journalières et de différenciation des ambiances climatiques. Par ailleurs, la stratégie de collecte de données répond également à des problématiques spécifiques telles que l'évaluation de l'impact de l'orientation des structures en termes d'ensoleillement et de vents dominants, et celle de la distinction entre ambiances forestières où la végétation est susceptible de tempérer l'agressivité des paramètres climatiques, et ambiances dégagées où les matériaux sont directement exposés aux agents atmosphériques.

2.1. Saisonnalité des paramètres climatiques

Les données retenues pour la caractérisation de l'ambiance climatique générale dans laquelle les structures étudiées s'inscrivent sont issues des enregistrements effectués

pendant une année, sur la façade sud de la structure I de Xpuhil (« Édifice des trois tours »). D'une part, le site étant dégagé du couvert forestier, les potentiels effets modérateurs de ce dernier sur les paramètres climatiques ne sont pas enregistrés. D'autre part, l'exposition au sud, avec un ensoleillement optimal, permet de mesurer l'expression maximale des amplitudes hygrothermiques. La figure V-14 montre l'évolution mensuelle des températures au cours de l'année écoulée entre mars 2013 et février 2014, ainsi que les valeurs maximales, minimales et moyennes enregistrées durant la mesure.

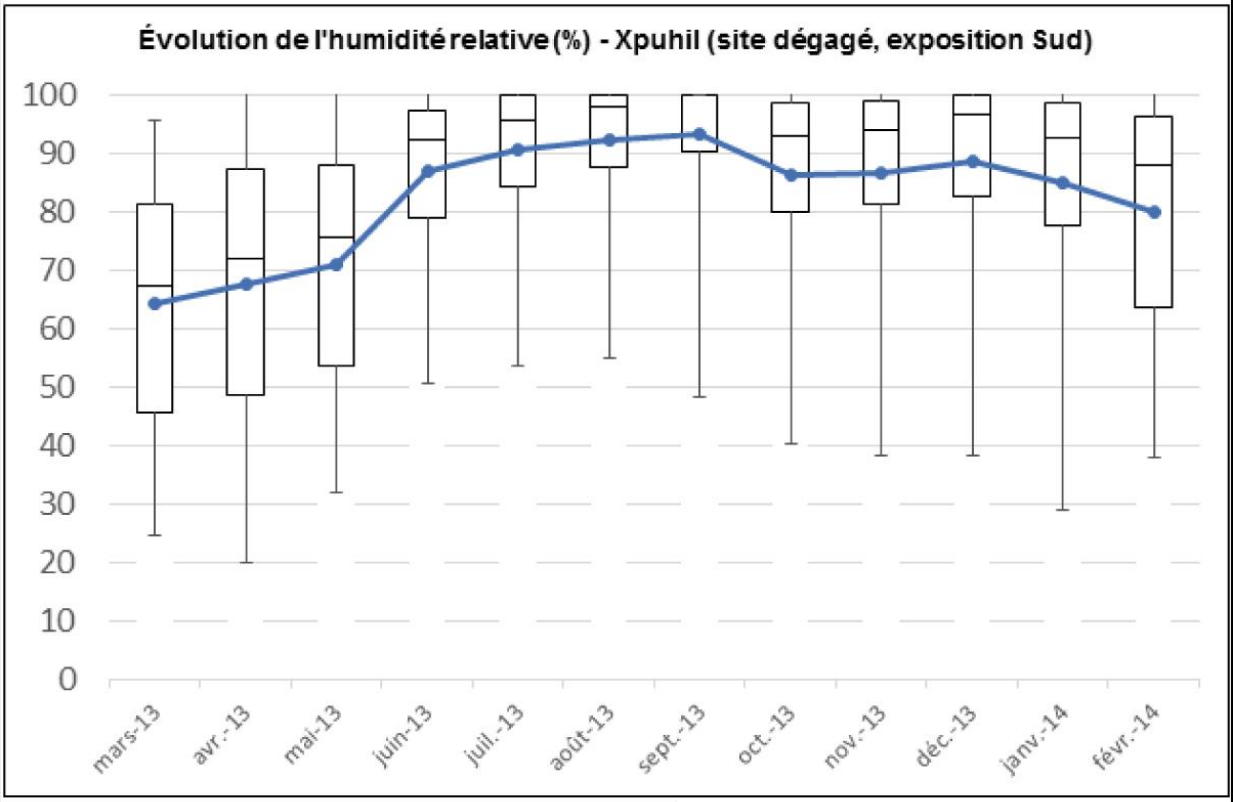


	T°C moy	T°C max	T°C min	T°C σ
mars-13	28,00	45,58	18,61	6,33
avr-13	28,65	41,59	16,11	5,36
mai-13	28,34	41,59	19,11	4,56
juin-13	26,52	35,11	20,11	3,09
juil-13	25,97	34,11	21,62	2,82
août-13	26,07	35,11	21,62	3,22
sept-13	26,73	40,1	22,12	3,63
oct-13	27,92	42,59	22,12	4,85
nov-13	26,66	44,09	16,61	5,52
déc-13	25,67	43,09	18,61	5,17
janv-14	24,05	43,09	12,6	5,92
févr-14	26,87	41,09	18,11	5,95

Fig. V-14. Évolution des températures enregistrées sur la façade sud de la structure I de Xpuhil.

La température moyenne annuelle enregistrée à la surface de la pierre sur la structure I de Xpuhil est de 26,72°C. Si les températures moyennes mensuelles ne présentent pas d'écarts significatifs par rapport à cette valeur annuelle, on distingue des différences d'amplitude thermique marquées d'un mois à l'autre. De février à mai, cette amplitude thermique est importante, d'environ 20°C, avec des maxima de l'ordre de 37 à 40°C contre des minima inférieurs à 20°C. De juin à octobre, les amplitudes thermiques tombent à 10°C, avec 32 à 34°C au maximum contre 20 à 22°C au minimum. Enfin, de novembre à janvier, les amplitudes réaugmentent mais les valeurs sont plus hétérogènes. Cette dernière période est marquée par un refroidissement général, notamment des températures minimales qui passent sous la barre des 20°C – atteignant même la température minimale de 12,6°C, enregistrée en janvier – alors que les températures maximales restent à un niveau similaire à celui de la période précédente. L'humidité relative, enregistrée par le même capteur, connaît elle aussi une évolution annuelle marquée par une certaine saisonnalité (Fig. V-15).

Le taux d'humidité relative moyenne annuelle enregistré sur la structure I de Xpuhil s'élève à 83,62%. Il croît progressivement de mars à juin, où il augmente brusquement pour rester très élevé jusqu'en septembre. Cette saturation en eau diminue ensuite à partir d'octobre, et reste relativement stable entre 80 et 90% jusqu'en février où le taux d'humidité moyen mensuel retrouve progressivement un niveau inférieur à 80%. Les amplitudes hygrométriques restent quant à elles importantes tout au long de l'année, avec des différences entre les valeurs minimales et maximales allant de 45% en août à 80% en avril. En termes de saisonnalité, on remarque une différence notable entre la période de juin à janvier au cours de laquelle l'humidité relative ne descend pas en dessous de 80% et la période de février à mai au cours de laquelle les amplitudes hygrométriques sont plus importantes, mais les valeurs moyennes mensuelles restent situées entre 60 et 80%. Enfin, des valeurs maximales de 100% sont enregistrées pratiquement toute l'année, à l'exception des mois de mars et avril, au cours desquels les valeurs minimales ne descendent qu'à de rares occurrences en dessous de 30%.



	HR% moy	HR% max	HR% min	HR% σ
mars-13	64,14	92,66	24,42	19,92
avr-13	67,71	94,63	19,74	20,20
mai-13	70,93	99,36	31,93	19,05
juin-13	86,84	100,00	50,68	12,95
juil-13	90,47	100,00	53,55	11,43
août-13	92,18	100,00	54,99	10,89
sept-13	93,06	100,00	48,18	11,35
oct-13	86,06	100,00	40,15	16,21
nov-13	86,65	100,00	38,15	16,23
déc-13	88,53	100,00	38,12	15,58
janv-14	84,96	100,00	28,99	17,84
févr-14	79,88	100,00	37,78	19,69

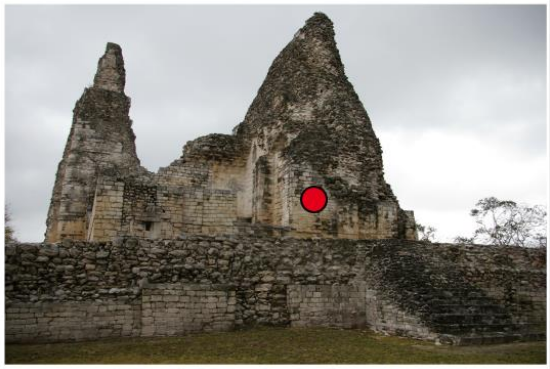


Fig. V-15. Évolution annuelle de l'humidité relative enregistrée sur la structure I de Xpuhil.

Cette première approche des paramètres climatiques permet d'identifier une saisonnalité de ces derniers, dans laquelle se distinguent trois saisons (Fig. V-16) aux caractéristiques particulières :

1) La **saison sèche**, de février à mai inclus, au cours de laquelle les températures restent stables à un niveau élevé (environ 28°C), avec de grandes amplitudes thermiques (environ 20°C). Les valeurs moyennes du taux d'humidité relative

oscillent entre 60 et 80%, avec des amplitudes également très importantes, allant de 60 à 80% d'écart entre les valeurs maximales et minimales enregistrées ;

2) La **saison des pluies**, de juin à septembre inclus, au cours de laquelle les températures moyennes sont stables (autour de 26°C), mais inférieures à celles de la saison précédente, avec des amplitudes thermiques plus réduites (températures maximales juste supérieures à 30°C, températures minimales oscillant entre 20 et 22°C). Les taux moyens d'humidité relative sont particulièrement élevés (entre 87 et 93%), avec des amplitudes nettement réduites (inférieures à 50%) ;

3) Une **saison de transition**, d'octobre à janvier inclus, au cours de laquelle les températures moyennes baissent de 28 à 24°C sur la période, avec des valeurs plus hétérogènes et des amplitudes plus marquées. Les taux moyens d'humidité relative restent élevés (de 85 à 88%) et stables, avec également des amplitudes plus marquées.

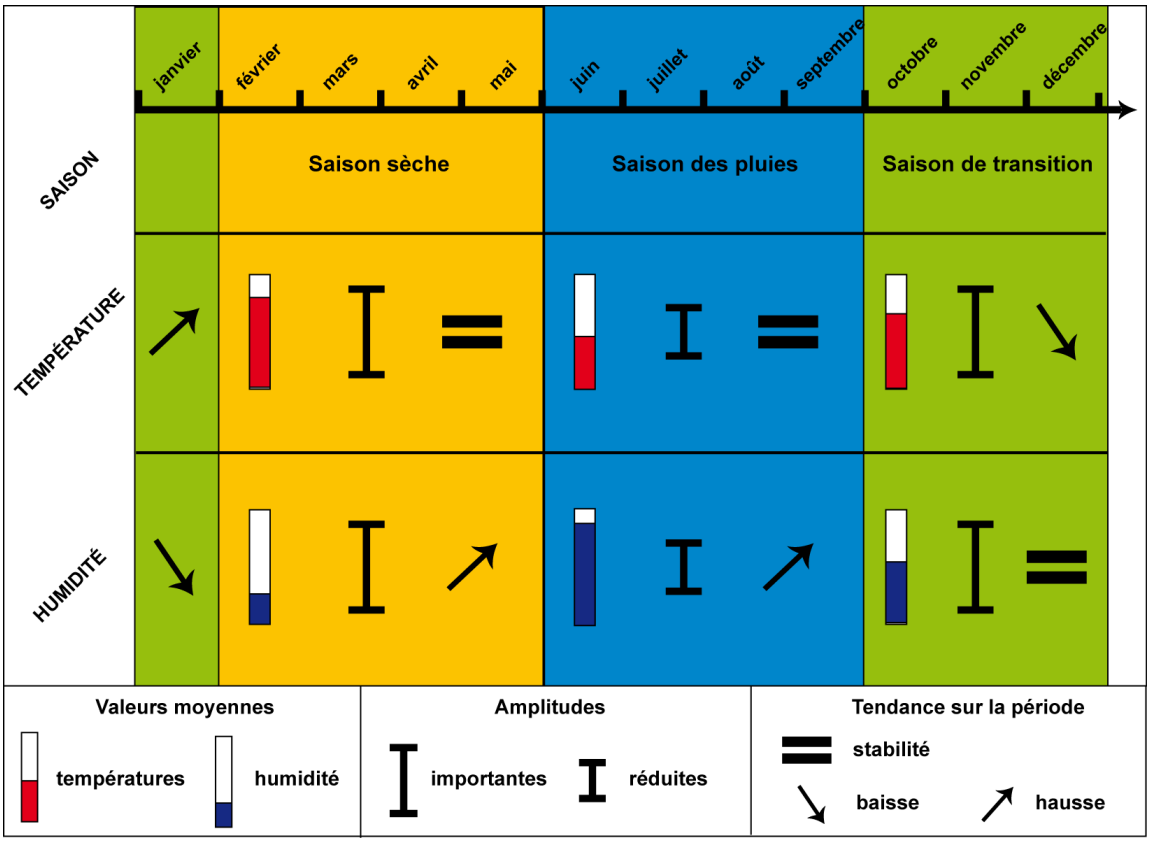


Fig. V-16. Schéma synthétique de la saisonnalité des paramètres climatiques.

Au cours des saisons identifiées, les amplitudes hygrothermiques journalières jouent un rôle important car elles sont largement susceptibles de conditionner le niveau de stress climatique auquel sont soumis les édifices. Ces amplitudes journalières varient fortement tout au long de l'année (Fig. V-17), tant pour les températures que pour l'humidité relative. Quant aux amplitudes thermiques, elles sont importantes et relativement homogènes lors de la saison sèche, plus réduites et très homogènes lors de la saison des pluies, alors qu'elles se caractérisent par leur forte hétérogénéité lors de la saison de transition. En ce qui concerne les amplitudes hygrométriques, elles sont également importantes et homogènes lors de la saison sèche, plus réduites mais plus hétérogènes lors de la saison des pluies. La saison de transition est, ici aussi, marquée par la grande variabilité des écarts journaliers observés.

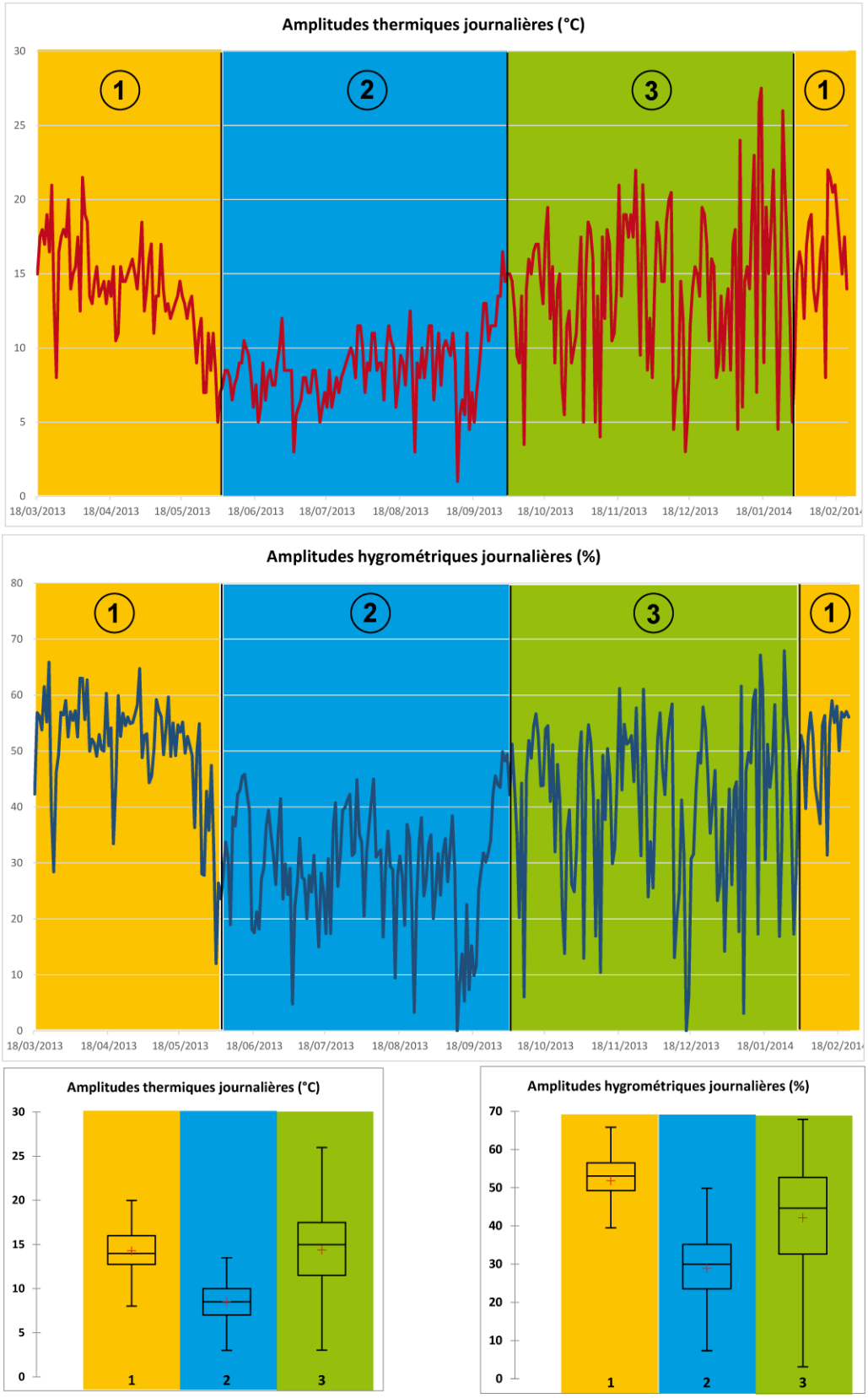


Fig. V-17. Variations annuelles des amplitudes hygrothermiques journalières au cours de la saison sèche (1), de la saison des pluies (2), et de la saison de transition (3).

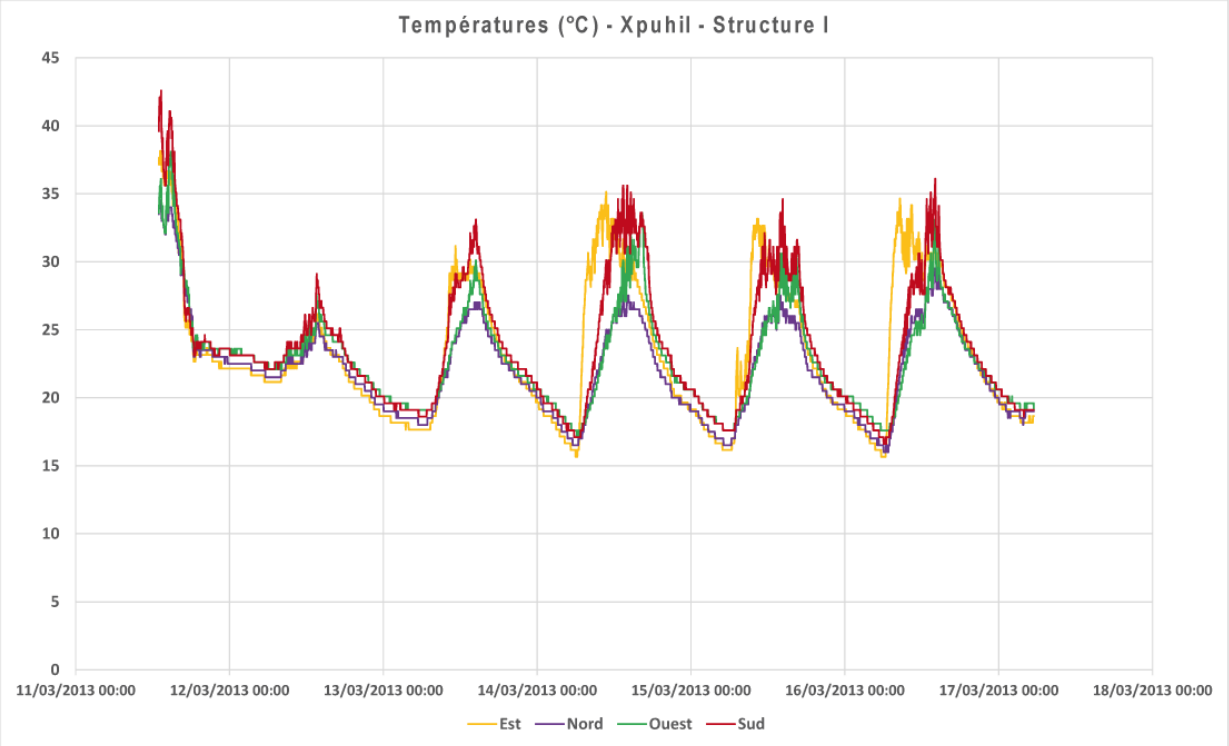
Les paramètres climatiques enregistrés pendant une année complète sur la façade sud de la structure I de Xpuhil sont donc marqués par une saisonnalité affirmée qui est largement susceptible de conditionner une variabilité de leur agressivité et de l'action des processus associés tout au long de l'année. Les trois saisons identifiées correspondent à des ambiances climatiques finalement assez différentes, dans lesquelles les structures vont évoluer à différentes périodes de l'année. La caractérisation de cette saisonnalité et l'identification des principaux paramètres de chaque saison offre bon nombre d'éléments de discussion sur l'action, l'efficacité et la temporalité des processus érosifs. En revanche, l'exposition des différentes façades des édifices, souvent orientés avec soin vers les points cardinaux, doit également être étudiée afin de mettre en évidence d'éventuelles différences liées à cette exposition.

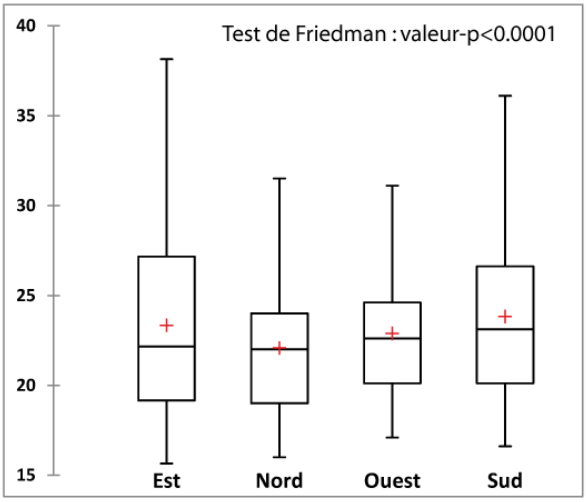
2.2. Le rôle de l'orientation des structures

Par la position géographique de la péninsule du Yucatán, les structures étudiées sont exposées à l'est en ce qui concerne les vents dominants venant de la mer des Caraïbes, et au sud en termes d'ensoleillement maximal. Afin de différencier les caractéristiques des paramètres climatiques sur les quatre expositions des édifices, un traitement statistique a été effectué sur les mesures réalisées pendant une semaine, avec une résolution beaucoup plus fine que celle de la mesure annuelle, toujours sur la structure I de Xpuhil. Ces enregistrements concernent la période du 11 au 17 mars 2013, donc en saison sèche, avec une météo pluvieuse le 11, nuageuse le 12, puis un temps calme et ensoleillé jusqu'au 17.

En ce qui concerne les températures (Fig. V-18), la journée nuageuse est plutôt homogène sur les quatre expositions. En revanche, lors des journées ensoleillées, on remarque que les expositions est et sud se réchauffent plus tôt et plus vite que les expositions nord et ouest. Sur les premières, les températures moyennes restent élevées et les amplitudes thermiques sont beaucoup plus marquées avec notamment sur l'exposition sud une température maximale supérieure de 4°C par rapport aux autres expositions, et même de 8°C par rapport à la façade orientée au nord. Les expositions ouest et nord, quant à elles, mettent plus de temps à se réchauffer et évoluent dans une ambiance climatique plus homogène, avec des amplitudes thermiques beaucoup plus réduites. La différence

significative des quatre expositions est validée par le test de Friedman, et le test post-hoc de Nemenyi.





	Est	Nord	Ouest	Sud
Minimum	15,66	16,01	17,10	16,61
Maximum	38,15	34,51	38,10	42,59
Moyenne	23,34	22,07	22,89	23,83
Écart-type	5,01	3,50	3,69	4,80

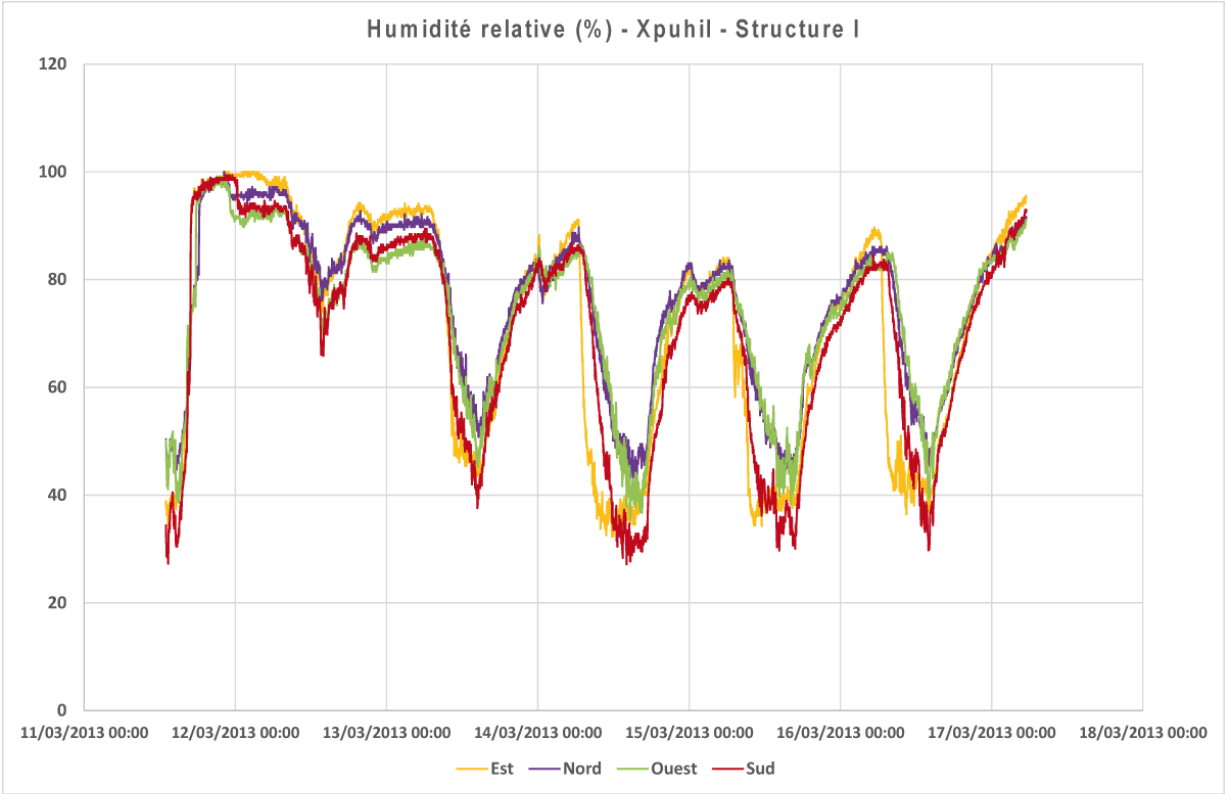
Test post-hoc de Nemenyi :

Orientation	Nord	Est	Ouest	Sud
Fréquence	4096	4096	4096	4096
Somme	6309	8459	11481	14711
Moyenne	1,54	2,07	2,80	3,59
Groupes	A			
		B		
			C	
				D

Fig. V-18. Traitement statistique des températures mesurées sur la structure I de Xpuhil, en fonction des quatre expositions.

On retrouve les mêmes tendances pour l'humidité relative (Fig. V-19), laquelle est intimement corrélée aux températures, avec une baisse plus forte et plus rapide au début des journées ensoleillées sur les expositions est et sud. Ces dernières se différencient ici aussi assez clairement des expositions nord et ouest, avec cependant des amplitudes

hygrométriques plus homogènes que les amplitudes thermiques. De même que pour les données de température, le test de Friedman et le test post-hoc de Nemenyi confirment la différence significative entre les échantillons.



	Est	Nord	Ouest	Sud
Minimum	32,33	42,65	35,32	27,16
Maximum	100	100	99	99,4
Moyenne	71,37	75,62	73,92	70,06
Écart-type	21,16	15,17	14,68	19,44

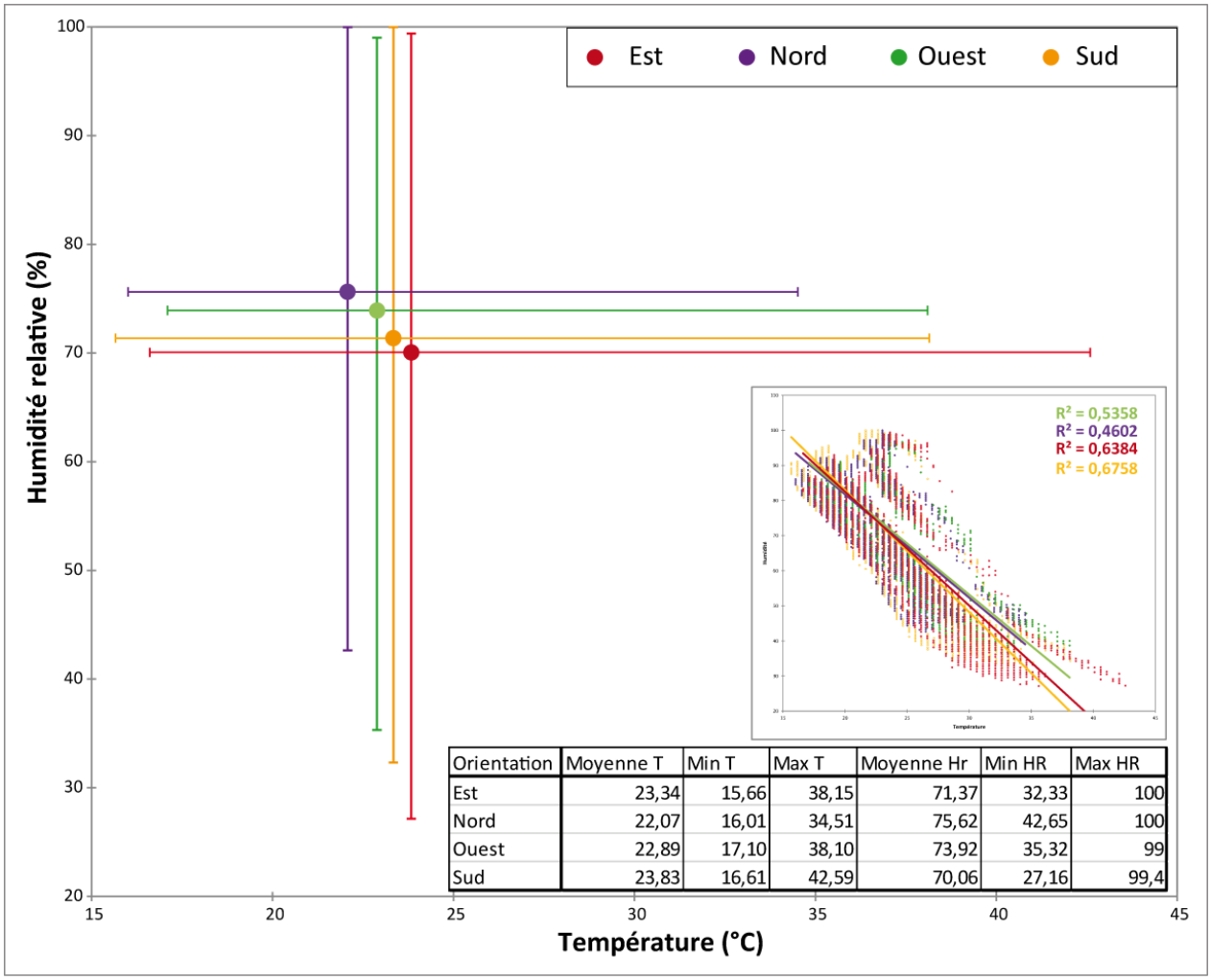
Test post-hoc de Nemenyi :

Orientation	Sud	ouest	Est	Nord
Fréquence	4096	4096	4096	4096
Somme	6495	9885	11202	13378
Moyenne	1,59	2,41	2,73	3,27
Groupes	A			
		B		
			C	
				D

Fig. V-19. Traitement statistique de l'humidité relative mesurée sur la structure I de Xpuhil, en fonction des quatre expositions.

Le couplage des données de température et d'humidité permet une synthèse des paramètres climatiques en fonction de l'orientation des structures (Fig. V-20). Le contraste

des expositions nord et ouest avec les expositions sud et est se confirme dans les courbes de tendance linéaires qui montrent la progression similaire et concomitante des deux couples, notamment sur un ensemble de données correspondant à des températures élevées et à des taux d'humidité relative assez bas, probablement associé aux débuts de journée lorsque le réchauffement et le séchage sont bien plus rapides sur les expositions sud et est.



Orientation	Moyenne T	Min T	Max T	Moyenne Hr	Min HR	Max HR
Est	23,34	15,66	38,15	71,37	32,33	100
Nord	22,07	16,01	34,51	75,62	42,65	100
Ouest	22,89	17,10	38,10	73,92	35,32	99
Sud	23,83	16,61	42,59	70,06	27,16	99,4

Fig. V-20. Synthèse du couplage des données de température et d'humidité relative sur les différentes expositions de la structure I de Xpuhil. Le graphique réduit montre la distribution des données et les courbes de tendance pour les différentes expositions.

Les différentes expositions se différencient également par un gradient progressif nord, ouest, sud puis est, allant d'une ambiance climatique marquée par de basses températures, une humidité relative importante, et des amplitudes hygrothermiques réduites à une ambiance climatique plus chaude, moins humide, où les amplitudes hygrothermiques sont plus importantes. L'orientation des différentes façades des structures

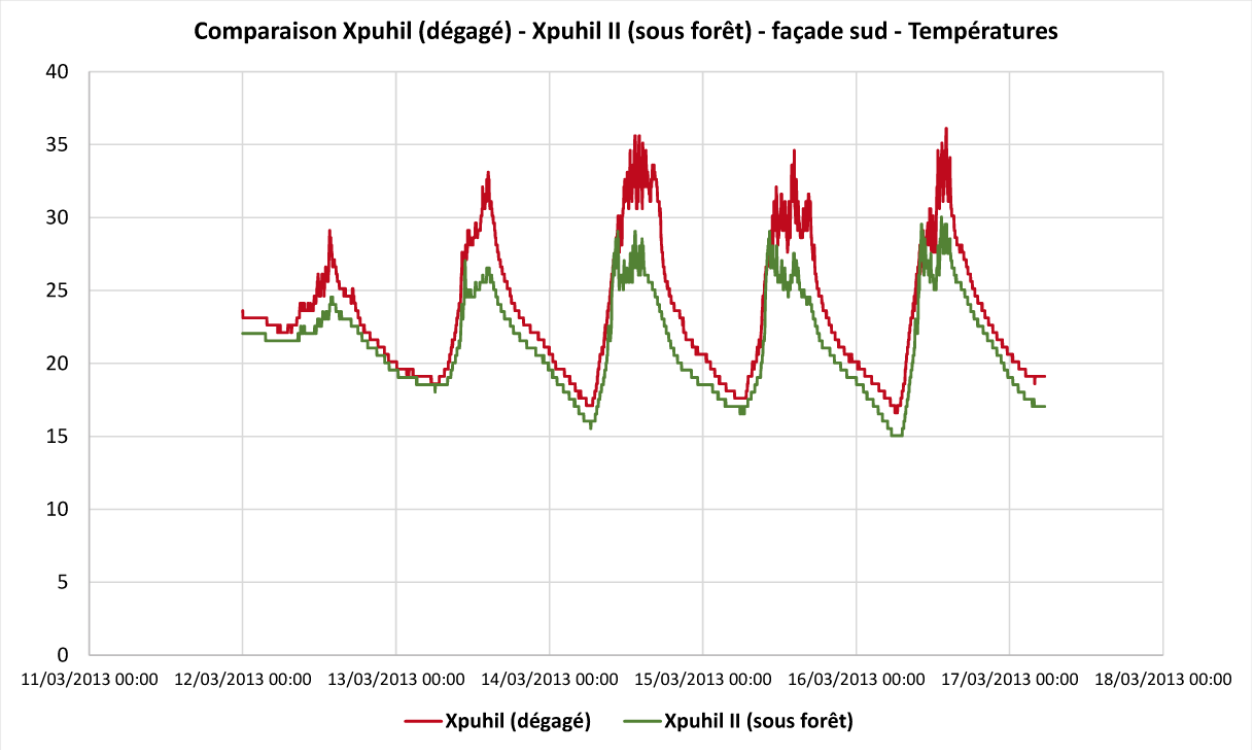
archéologiques est donc largement susceptible de jouer un rôle prédominant dans la dynamique érosive, dans le sens où la variabilité des paramètres climatiques en fonction de l'exposition favorise l'expression et l'efficacité des processus érosifs. Toutefois, un certain nombre d'autres facteurs peuvent également avoir un impact, si ce n'est entièrement commander des régimes et des vitesses d'érosion largement distincts sur une même structure. C'est le cas par exemple de l'environnement immédiat dans lequel s'inscrivent les monuments, et notamment des paramètres climatiques contrastés entre des édifices non dégagés, enfouis dans le couvert forestier, et des édifices exposés à l'air libre.

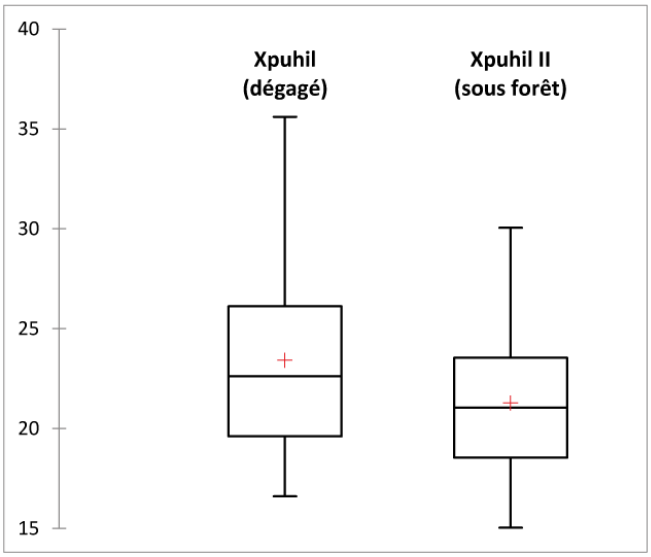
2.3. Ambiances forestières et dégagées

Les données utilisées à des fins de comparaison entre ambiances forestières et dégagées ont été enregistrées sur la même période d'une semaine que celles qui ont servi à différencier les paramètres climatiques en fonction de l'orientation des édifices. La façade sud de la structure I de Xpuhil (ambiance dégagée) et la façade sud de la structure dénommée Xpuhil II, située à quelques centaines de mètres de la première, enfouie dans le couvert forestier, permettent la comparaison de ces deux ambiances associées à l'environnement immédiat dans lequel s'inscrivent les monuments. Au même titre que pour l'analyse de la variabilité saisonnière et la caractérisation générale des paramètres climatiques, le choix de la façade sud se justifie ici aussi par l'expression maximale des contrastes potentiels pouvant fournir des éléments d'interprétation relatifs à l'effet de l'environnement immédiat sur les paramètres climatiques.

En ce qui concerne les températures (Fig. V-21), s'il n'y a pas de différence entre les minimales et les maximales enregistrées – environ 1,5°C – sur les deux structures, la température maximale enregistrée sur Xpuhil I, édifice dégagé, est supérieure de plus de 6°C à celle mesurée son homologue forestier. De même, la température moyenne en ambiance dégagée est supérieure de plus de 2°C à celle de l'ambiance forestière et les amplitudes thermiques bien plus importantes (20°C pour le site dégagé, 15°C pour le site couvert). Par ailleurs, bien que les tests statistiques de Wilcoxon et de Mann-Whitney confirment la différence significative des échantillons, on remarque qu'ici l'évolution des températures au cours des journées mesurées est similaire et concomitante sur les deux

édifices, et ce malgré la différence de leur environnement immédiat. La distinction des ambiances forestières et dégagées, en termes de températures, est donc surtout fondée sur la variabilité des amplitudes thermiques auxquelles les structures sont soumises.





	Xpuhil (dégagé)	Xpuhil II (sous forêt)
Nb. Observations	3765	3765
Minimum	16,61	15,04
Maximum	36,11	30,05
Médiane	22,62	21,05
Moyenne	23,41	21,27
Variance (n-1)	19,26	10,85
Écart-type (n-1)	4,39	3,29

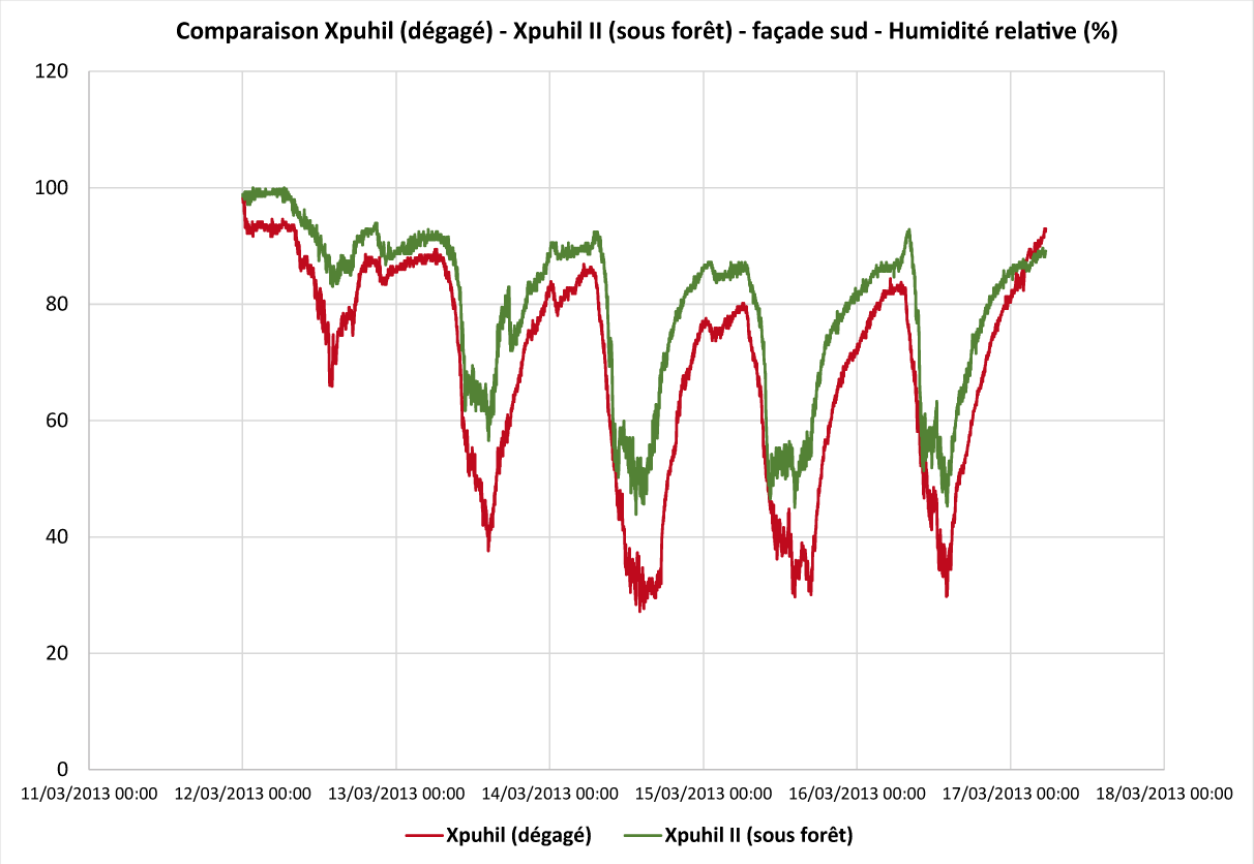
Test de Wilcoxon : valeur-p < 0,0001

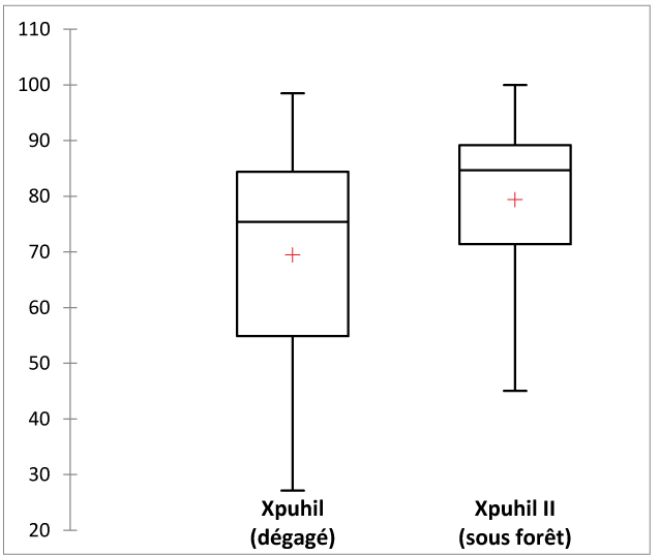
Test de Mann-Whitney : valeur-p < 0,0001

Fig. V-21. Comparaison des températures enregistrées sur la façade sud de la structure I de Xpuhil (ambiance dégagée) et sur la façade sud de la structure Xpuhil II (ambiance forestière).

On retrouve la même structure dans les données d'humidité relative (Fig. V-22), à la différence que c'est le taux minimal enregistré qui est bien supérieur (15% de plus) sous le

couvert forestier, ainsi que le taux moyen (10% de plus). En revanche, comme pour les températures, les amplitudes hygrométriques sont largement plus importantes sur la structure exposée à l'air libre (plus de 70%) que sur la structure forestière (environ 50%).





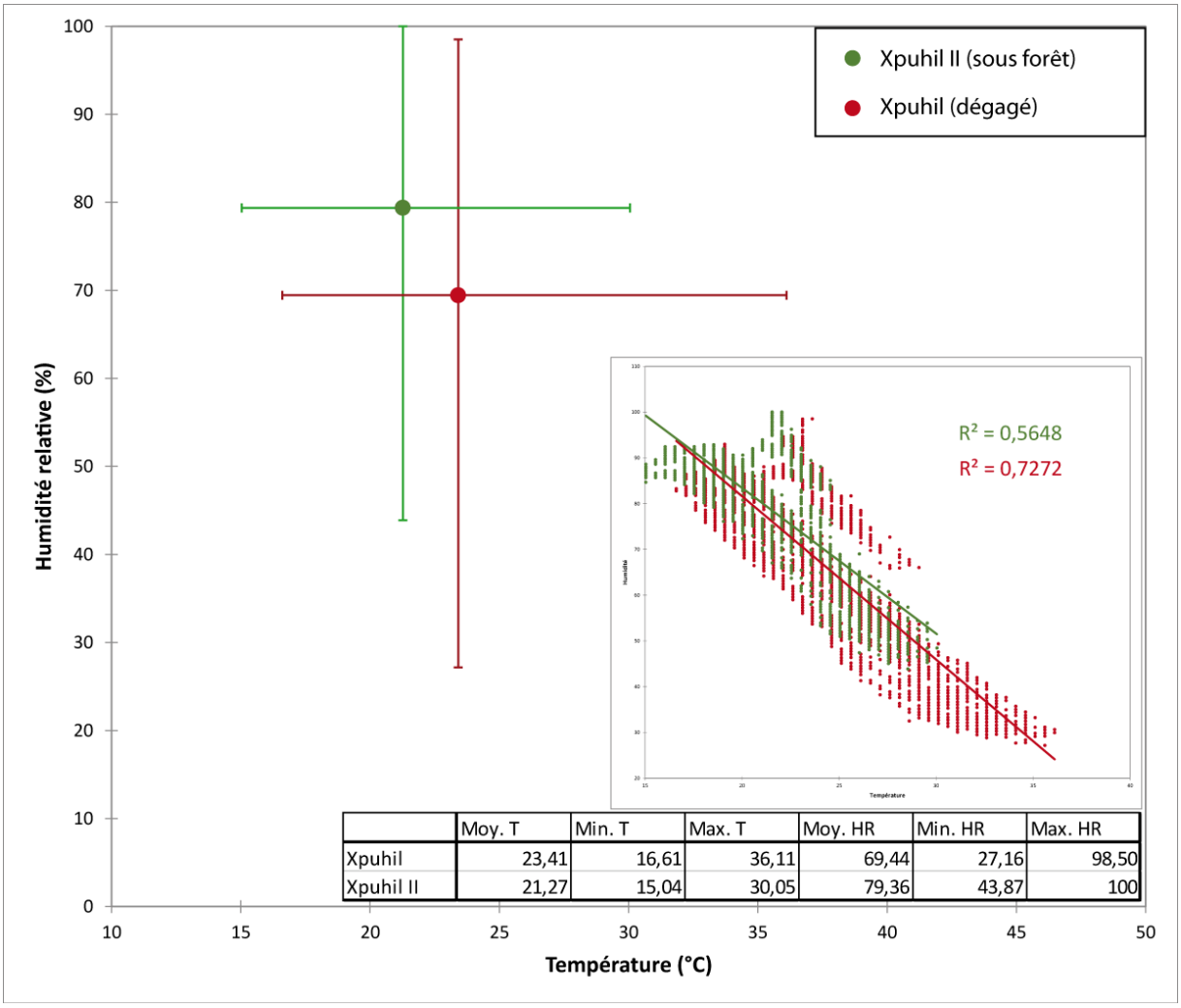
	Xpuhil (dégagé)	Xpuhil II (sous forêt)
Nb. observations	3765	3765
Minimum	27,16	43,87
Maximum	98,50	100
Médiane	75,38	84,68
Moyenne	69,44	79,37
Variance (n-1)	337,04	194,41
Écart-type (n-1)	18,36	13,94

Test de Wilcoxon : valeur-p < 0,0001

Test de Mann-Whitney : valeur-p < 0,0001

Fig. V-22. Comparaison des taux d'humidité relative enregistrés sur la façade sud de la structure I de Xpuhil (ambiance dégagée) et sur la façade sud de la structure Xpuhil II (ambiance forestière).

Le couplage des données de température et d'humidité relative permet ici encore une synthèse de la variabilité des paramètres climatiques en fonction de l'environnement immédiat des structures (Fig. V-23). Sous forêt, les taux d'humidité relative sont bien plus importants et les températures bien inférieures, avec des amplitudes hygrothermiques plus restreintes que dans un environnement dégagé. Inversement, dans les structures exposées à l'air libre, les taux d'humidité relative sont moins importants alors que les températures sont bien supérieures, avec des amplitudes hygrothermiques plus marquées. Cette variabilité des paramètres climatiques induit des régimes climatiques distincts dans lesquels s'inscrivent les monuments, et sont largement susceptibles d'influencer les modalités de la dynamique érosive et l'efficacité des processus érosifs.



	Moy. T	Min. T	Max. T	Moy. HR	Min. HR	Max. HR
Xpuhil	23,41	16,61	36,11	69,44	27,16	98,50
Xpuhil II	21,27	15,04	30,05	79,36	43,87	100

Fig. V-23. Synthèse du couplage des données de température et d'humidité relative sur les façades sud des structures I de Xpuhil et Xpuhil II. Le graphique réduit montre la distribution des données et les courbes de tendance pour les ambiances climatiques forestière et dégagée.

Au terme de l'analyse des paramètres climatiques, il apparaît que les structures archéologiques du secteur Río Bec évoluent dans une ambiance climatique générale chaude et humide, typique des milieux tropicaux, avec des températures moyennes mensuelles à une exception près toujours supérieures à 25°C et des taux mensuels moyens d'humidité relative toujours supérieurs à 60%. En revanche, ce « portrait » climatique se nuance par une saisonnalité relativement marquée, où trois saisons se distinguent : saison sèche, saison des pluies, et saison de transition. En outre, les amplitudes hygrothermiques journalières varient fortement tout au long de l'année, notamment au cours de la saison de transition. L'orientation des structures joue également un rôle non négligeable dans l'expression des paramètres climatiques. Les mesures montrent à cet égard un gradient nord, ouest, sud, est, régressif pour l'humidité, progressif pour les températures et les amplitudes hygrothermiques. Enfin, l'étude des ambiances climatiques forestières et dégagées met en évidence l'effet modérateur de la végétation sur les paramètres climatiques : les monuments enfouis sous le couvert forestier évoluent dans une ambiance microclimatique plus humide et plus fraîche que les édifices situés en milieu découvert, qui se caractérisent eux par des amplitudes hygrothermiques beaucoup plus marquées.

Conclusion du chapitre V

Les facteurs de contrôle qui conditionnent la dynamique érosive dans le secteur archéologique Río Bec paraissent donc, à l'aune de ces résultats, réunir toutes les conditions pour une détérioration rapide des matériaux de construction, préoccupante pour les acteurs de la conservation. Si la morphologie des structures et les modalités de la colonisation biologique peuvent induire une variabilité spatiale de l'efficacité des processus érosifs, les matériaux de construction et les ambiances climatiques dans lesquelles ils s'inscrivent font pencher la balance vers un déséquilibre néfaste pour les monuments.

Les matériaux de construction, étant essentiellement constitués de calcite, sont très sensibles à la dissolution dans un climat humide avec des précipitations importantes. La présence d'argiles favorise l'efficacité des processus de détérioration mécanique à la faveur des fortes amplitudes hygrothermiques et des cycles de dessiccation et d'humectation. Aucun aspect de la composition chimique des matériaux de construction ne vient plaider en faveur de leur durabilité face aux agressions environnementales. Issus de formations résiduelles secondaires très différentes des assises carbonatés classiques, les matériaux étudiés en lames minces sont caractérisés par une imbrication de textures correspondant à des degrés de diagenèse plus ou moins avancés, conditionnant des réponses différentes aux agents bioclimatiques et favorisant l'efficacité d'une large variété de processus. Toutefois, la mise en évidence de l'activité de processus de biominéralisation secondaire peut expliquer le maintien d'un relatif équilibre susceptible de ralentir l'érosion des matériaux de construction.

Les paramètres climatiques que nous avons étudiés définissent des ambiances climatiques très agressives pour les matériaux carbonatés. Tout au long de l'année, ces derniers évoluent dans des ambiances chaudes et humides, avec de fortes amplitudes hygrothermiques. La saisonnalité du climat tropical est très marquée et les amplitudes hygrothermiques peuvent être très importantes, notamment sur les expositions sud et est, et il existe une différenciation nette des ambiances forestières et dégagées. Au total, les paramètres climatiques sont porteurs d'un potentiel d'agressivité peu propice à la

conservation des structures, récemment dégagées des monticules de terres et de végétation dans lesquels elles sont restées pendant des siècles.

Pour toutes ces raisons, si les sites archéologiques du secteur Río Bec constituent un patrimoine inestimable et unique au sein de l'aire culturelle maya, ils n'en sont pas moins associés à un enjeu de conservation élevé. En effet, tant par la vulnérabilité des matériaux dont ils sont construits que par l'important niveau de stress environnemental auquel ils sont soumis, ces monuments sont susceptibles d'être menacés par une dynamique érosive agressive, conditionnée par la conjugaison ces facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques. Disposant à présent d'une identification précise des trajectoires d'intervention des structures, d'un contrôle chronologique quasi-complet et d'une caractérisation des facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques de la détérioration dans le secteur Río Bec, nous sommes dès lors en mesure d'interpréter les résultats de diagnostic de la dynamique érosive que nous allons maintenant présenter.

Chapitre VI

Diagnostic de la dynamique érosive

« Je crois à la mémoire des pierres. Elles absorbent l'écho des conversations, des pensées. Elles incorporent l'odeur des hommes. Les pierres sauvages des grottes et les pierres sages des églises rayonnent d'une force mantique. On est toujours saisi quand on pénètre sous une voûte de pierre qui a abrité les hommes. »

Sylvain TESSON, *Une très légère oscillation,* 2017.

Le diagnostic de la dynamique érosive est la pierre angulaire de notre travail. A l'issue des caractérisations des matériaux de construction et des ambiances climatiques, il convient de s'intéresser aux modalités de l'érosion dans les sites archéologiques du secteur Río Bec. A travers l'analyse de données recueillies sur le terrain, visant à catégoriser les formes et les intensités de détérioration des matériaux et de leur colonisation biologique, cette étape consiste à caractériser les régimes d'érosion à l'œuvre, à identifier d'éventuels relais de processus, à établir des corrélations entre les différentes variables relevées, et à relier les résultats obtenus aux facteurs de contrôle. C'est donc, au cœur de notre approche, une opération centrale qui permet l'identification des éventuels forçages anthropiques sur l'érosion des matériaux de construction, ces derniers pouvant être mis en lumière par l'acquisition du contrôle chronologique présenté précédemment.

Les observations de terrain permettant de diagnostiquer la dynamique érosive ont été effectuées sur la base de l'identification des signatures érosives et de l'estimation des recouvrements biologiques présents sur des individus statistiques différents, à plusieurs échelles. D'abord, l'intégralité des parements des structures sélectionnées a été étudiée pour obtenir une vue d'ensemble de la dynamique érosive dans le secteur Río Bec, pouvant être cartographiée et analysée à l'aide de méthodes statistiques multivariées. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux différents corps des tours de la structure 5N2 du site éponyme de Río Bec, dont nous connaissons la chronologie des

dégagements successifs. A une échelle plus réduite, nous avons également étudié les blocs d'un parement de la structure V-A de Becán, lequel présentait un intérêt particulier en raison de la supposée variabilité spatiale des régimes d'érosion commandée par le dispositif architectonique. Enfin, nous nous sommes penchés sur les panneaux à damiers emblématiques du secteur, qui, en tant qu'éléments iconographiques répétés s'inscrivant dans différents contextes, nous offrent des possibilités de comparaison des modalités d'érosion dans ces mêmes contextes, qu'ils aient trait aux paramètres bioclimatiques ou à la chronologie des interventions. Le diagnostic de la dynamique érosive se décline donc en fonction d'un grand nombre de variables, étudiées de l'ensemble du secteur jusqu'aux éléments iconographiques les plus réduits, afin d'acquérir une lecture fine des modalités d'érosion dans les sites archéologiques étudiés.

1. Les parements du secteur Río Bec

Dans l'ensemble des sites archéologiques retenus, l'état actuel des parements des différentes chambres des structures a été évalué. Outre l'appréciation visuelle de leur état de conservation, fondée sur l'estimation des pertes de matière, les diverses signatures de processus érosifs observables ont été relevées, ainsi que le taux de recouvrement des parements par les organismes identifiés. Le premier objectif de cette opération, menée sur un grand nombre d'individus statistiques dans l'ensemble des sites du secteur, est de dresser un « portrait » général de l'état de conservation des structures dans la région en spatialisant les variables étudiées. Le deuxième est de disposer d'un jeu de données assez important pour identifier des corrélations entre niveaux de détérioration, signatures érosives et taux de recouvrement biologiques.

1.1. Cartographie de la dynamique érosive

A l'heure actuelle, l'état de conservation des structures du secteur Río Bec est susceptible d'être relativement variable en raison des contextes bioclimatiques dans lesquels elles s'inscrivent, et du degré d'attention qui leur a été porté par les archéologues et les restaurateurs. Ainsi, une première approche descriptive de spatialisation de cet état de conservation constitue un préambule pertinent à une étude plus poussée des variables étudiées à l'aide de méthodes statistiques. Les parements des structures sélectionnées ont donc été digitalisés dans un système d'information

géographique et les variables relevées sur le terrain ont été ajoutées afin d'aboutir à leur spatialisation.

1.1.1. État de conservation des parements

La méthode d'évaluation de l'état de conservation des parements des structures est essentiellement fondée sur une estimation visuelle des pertes de matière sur l'épiderme rocheux. Les parements ont donc été classés sur une échelle de quatre niveaux, de celui en bon état de conservation, à celui très détérioré dont les matériaux sont très érodés, avec des pertes de matière très importantes. Deux niveaux intermédiaires viennent compléter l'analyse, qui a été pratiquée par un seul observateur : l'auteur. La cartographie de l'état de conservation des parements sera présentée site par site, avant de proposer une comparaison intersites. Sur le site de Becán, l'état de conservation des parements est plutôt bon, avec 61 parements en bon état et 114 peu détériorés, contre 44 dans les catégories correspondant aux niveaux de détérioration les plus élevés (Fig. VI-1)

.

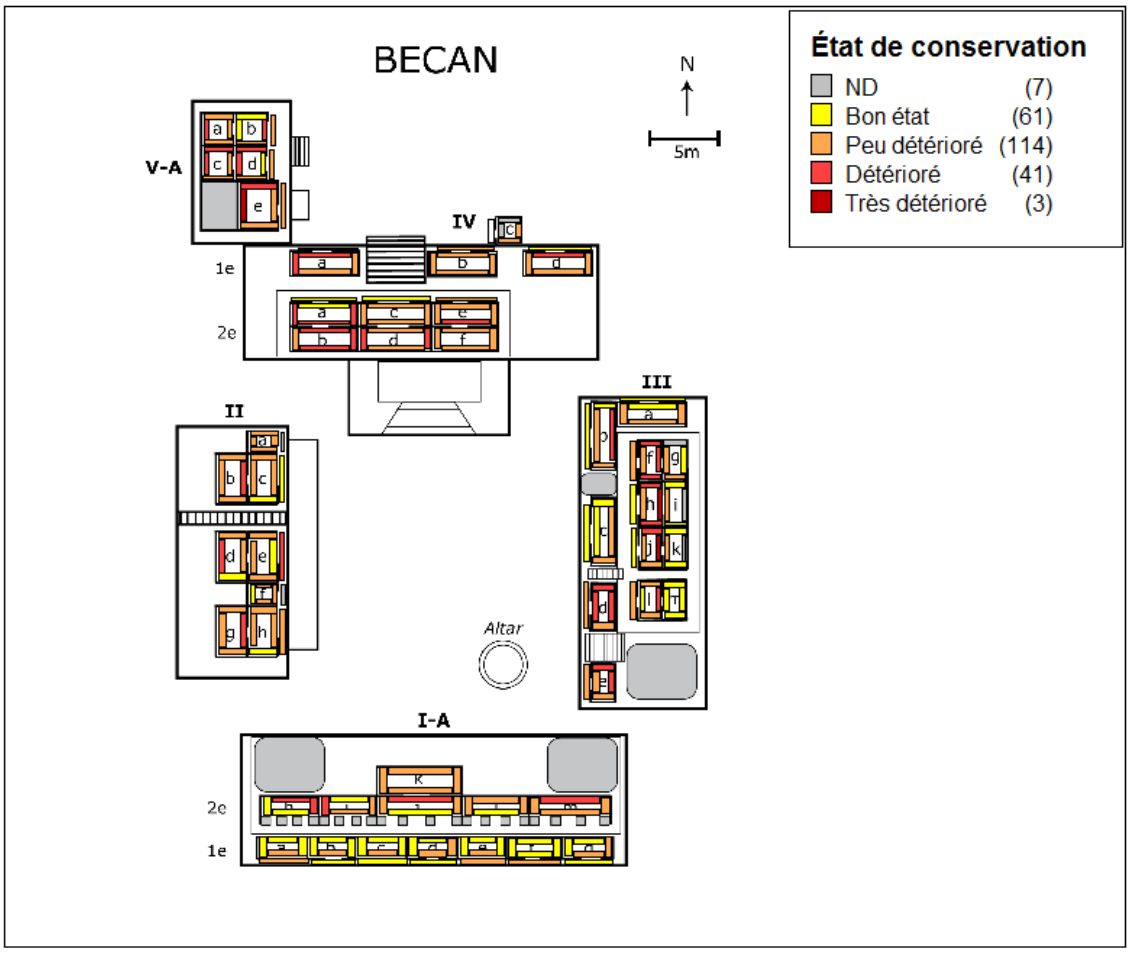


Fig. VI-1. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées à Becán.

On remarque cependant une variabilité de l'état de conservation des parements en fonction des structures de Becán. En effet, ceux des structures V-A et IV présentent des niveaux de détérioration plus avancés que ceux des structures II et III, les parements de la structure I-A présentant le meilleur état de conservation. Généralement, le niveau de détérioration de chaque chambre semble assez homogène, avec peu d'entre elles présentant un écart de plus d'un niveau entre les parements qui les composent. Le meilleur état de conservation pouvant être observé à Becán est celui des chambres du premier étage de la structure I-A, dont les parements sont très majoritairement en bon état.

En ce qui concerne Xpuhil (Fig. VI-2), la distribution de l'état de conservation des parements est proportionnellement assez similaire à celle de Becán, mais on retrouve moins d'individus en bon état. Les structures I et IV présentent des parements en meilleur état, avec une répartition plus homogène que les structures II et III où on trouve un nombre important de parements détériorés ou très détériorés.

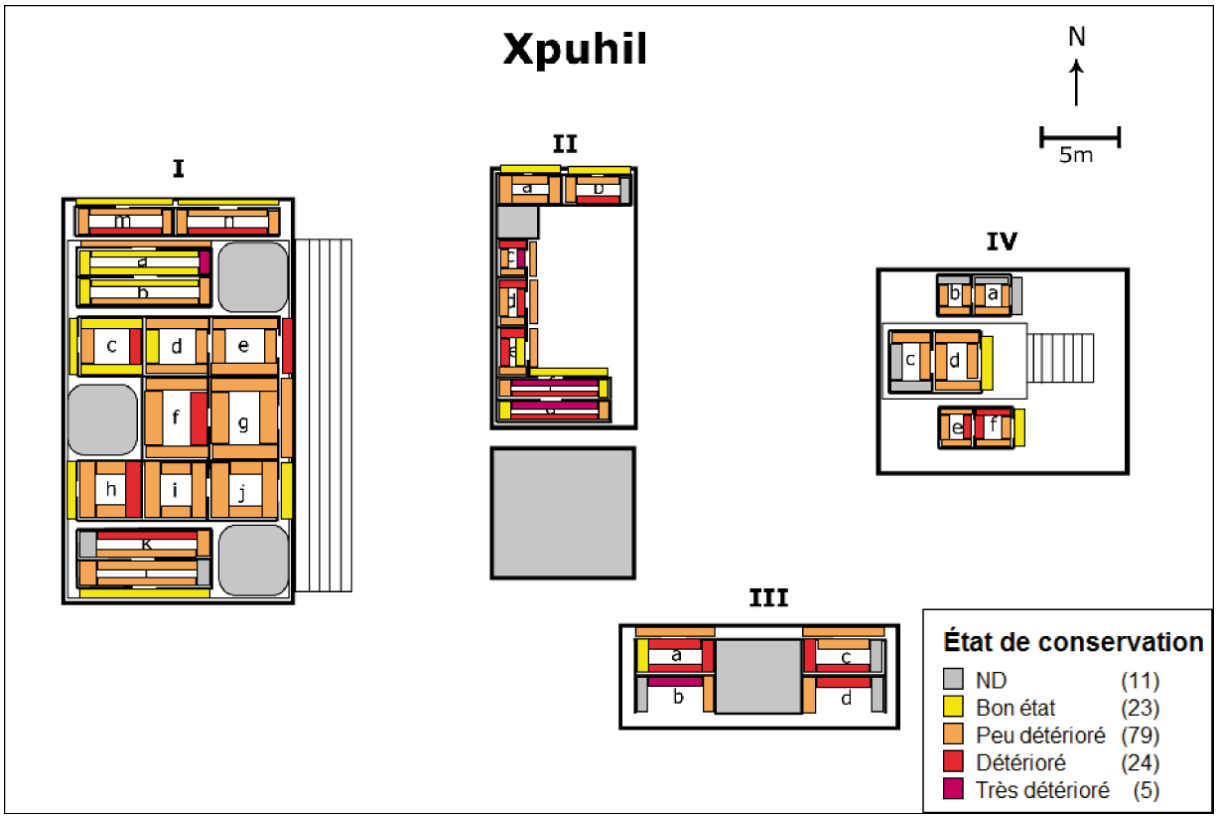


Fig. VI-2. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées à Xpuhil.

Sur le site éponyme de Río Bec (Fig. VI-3), l'état de détérioration est proportionnellement plus avancé que sur les deux autres sites. Même si aucun parement ne se classe dans la catégorie « très détérioré », une grande partie d'entre eux se classent dans la catégorie inférieure, qui se caractérise tout de même par un état de détérioration avancé. Aussi, très peu de parements restent en bon état de conservation et une grande majorité d'entre eux se classent dans catégorie « peu détérioré ». L'état de détérioration des parements du site éponyme de Río Bec est particulièrement avancé sur les chambres centrales de 6N2, sur la façade orientale de 6N1, et sur les chambres intérieures de 5N2.

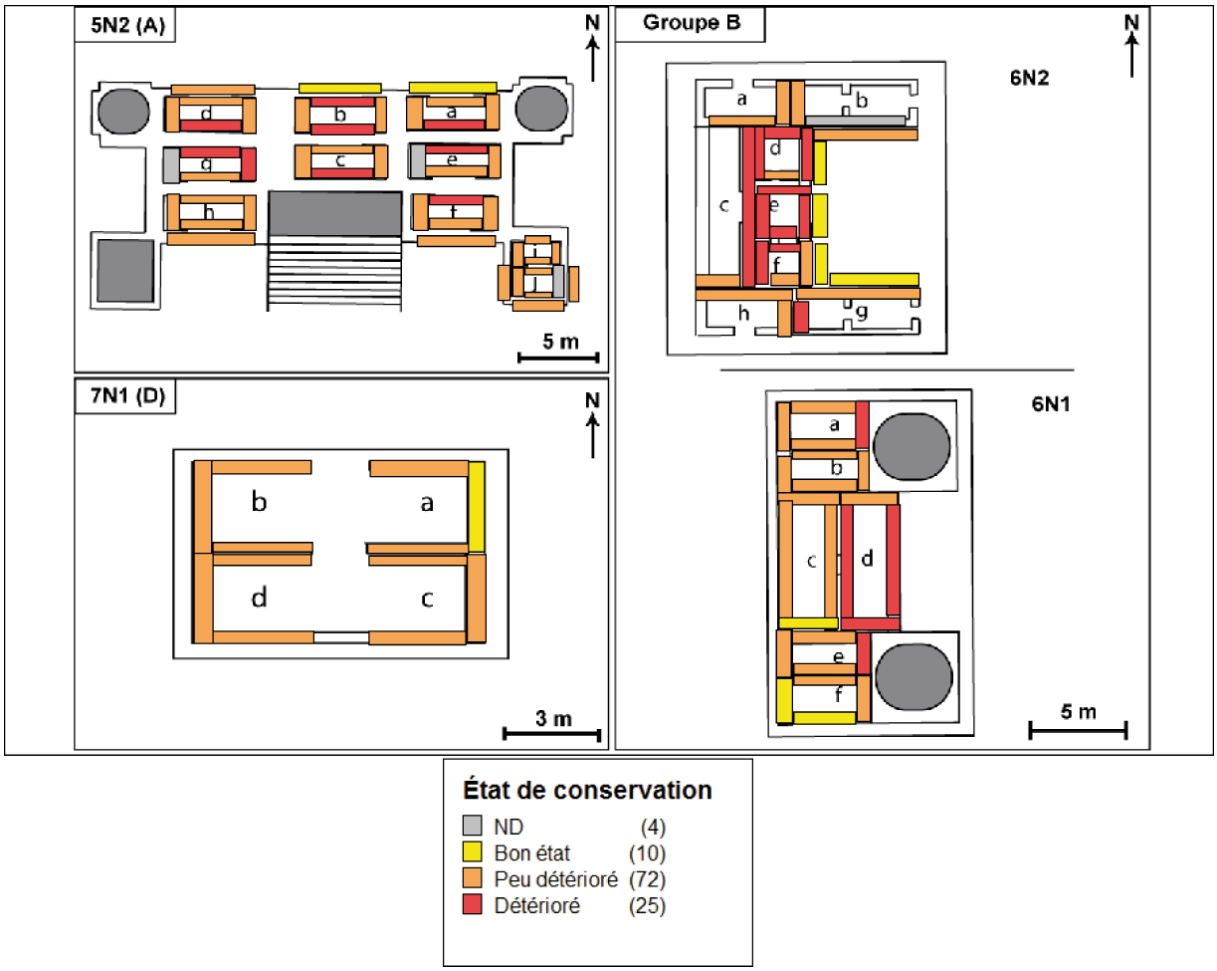


Fig. VI-3. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées sur le site éponyme de Río Bec.

La comparaison des données obtenues sur les trois sites (Fig. VI-4) confirme les précédentes observations. D'une part, la similitude de la distribution des parements dans les différentes classes est validée pour les sites de Becán et Xpuhil, alors que le site éponyme de Río Bec se distingue par une plus grande proportion de parements dont l'état de détérioration est plus avancé, et peu de parements en bon état de conservation.

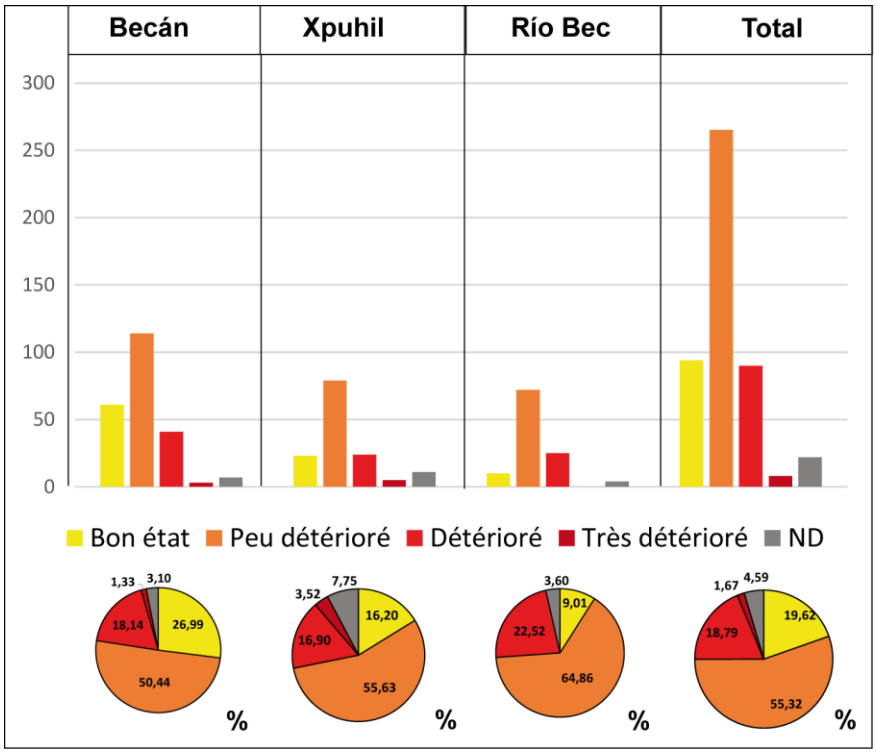


Fig. VI-4. Comparaison de l'état de conservation des parements sur les trois sites étudiés.

Cette première approche de la distribution spatiale de l'état de conservation des parements nous permet de distinguer Becán et Xpuhil d'un côté, et le site éponyme de Río Bec de l'autre. Cependant, il est indispensable, afin de pouvoir discuter des modalités de la dynamique érosive dans ces sites archéologiques, de s'intéresser aux processus érosifs responsables de la détérioration des matériaux.

1.1.2. Formes et signatures érosives

La présence ou l'absence des signatures relatives à l'expression de certains processus érosifs a été relevée en parallèle de l'état de conservation des structures. Parmi les formes d'érosion présentes à la surface des matériaux de construction, nous avons relevé : des cupules ou un aspect « fondu » en vaguelettes relatifs à la dissolution des carbonates ; la présence d'écailles millimétriques de desquamation ; une désagrégation granulaire préférentielle sur les lits de la roche, relative au délitage ; et le creusement, une forme d'alvéolisation linéaire et centimétrique, tant dans ses dimensions verticales et horizontales qu'en termes de profondeur. La présence de ces signatures érosives sur les trois sites étudiés est résumée statistiquement dans la figure VI-5.

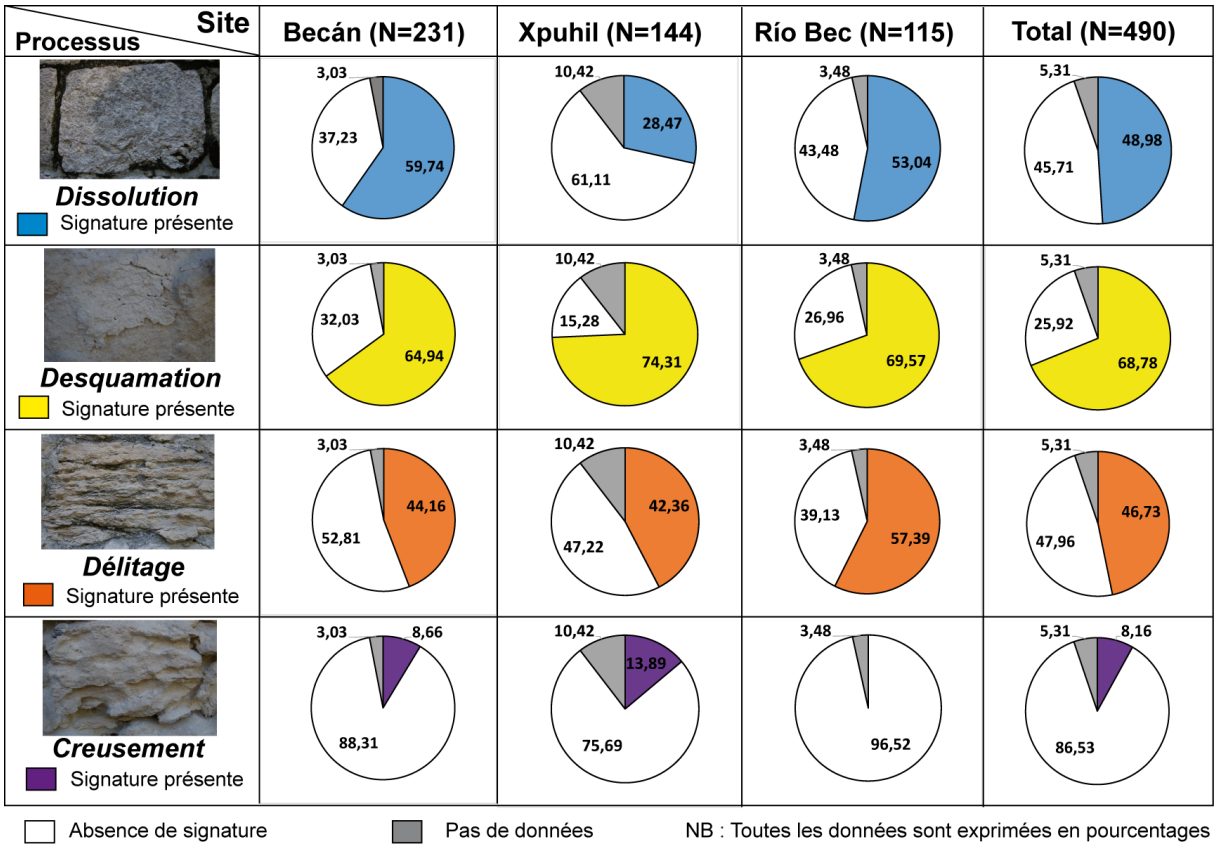


Fig. VI-5. Signatures érosives relevées sur les parements des trois sites d'étude.

Les signatures érosives de la dissolution sont présentes sur environ la moitié des parements du secteur Río Bec, avec une présence minimale à Xpuhil (28,47%) et maximale à Becán (59,74%). Des écailles de desquamation sont visibles sur près de 70% des parements des structures étudiées, et même jusqu'à 75% des parements de Xpuhil. La signature érosive du processus de délitage est quant à elle présente sur un peu moins de la moitié des parements du secteur, sauf sur le site éponyme où 57,39% des parements semblent affectés. En ce qui concerne les formes de creusement, elles ne s'observent que sur moins de 10% du total des parements, au maximum 14% de ceux de Xpuhil et aucun sur le site de Río Bec.

Au total, le site de Becán semble le plus représentatif de la présence moyenne des signatures érosives dans le secteur. Xpuhil se distingue par une présence moindre des formes de dissolution, et par une présence exacerbée des formes de desquamation et de creusement. Enfin, Río Bec se caractérise avant tout par l'absence de formes de creusement et par une prédominance des formes de délitage.

Si l'étude des signatures érosives présentes sur l'épiderme rocheux des matériaux de construction peut fournir des éléments d'interprétation pour caractériser la dynamique érosive dans le secteur, elle est confrontée à deux limites majeures. D'une part, les signatures érosives tendent à se superposer sur une pierre « palimpseste », les processus entraînant le plus de pertes de matière effaçant les plus superficiels et ceux étant intervenus précédemment. D'autre part, un grand nombre de formes de détérioration potentiellement visibles sont susceptibles d'être recouvertes par une colonisation biologique très active dans les ambiances climatiques tropicales.

1.1.3. Colonisation biologique

Quatre principaux types de recouvrements biologiques peuvent être observés dans le secteur archéologique de Río Bec : des biofilms noirs, des algues roses, des lichens blancs, et des mousses. La présence de ces organismes et le taux de recouvrement végétal (T.R.V.) sur les parements colonisés ont été relevés en parallèle de l'état de conservation des parements et des différentes signatures érosives présentes (Fig. VI-6).

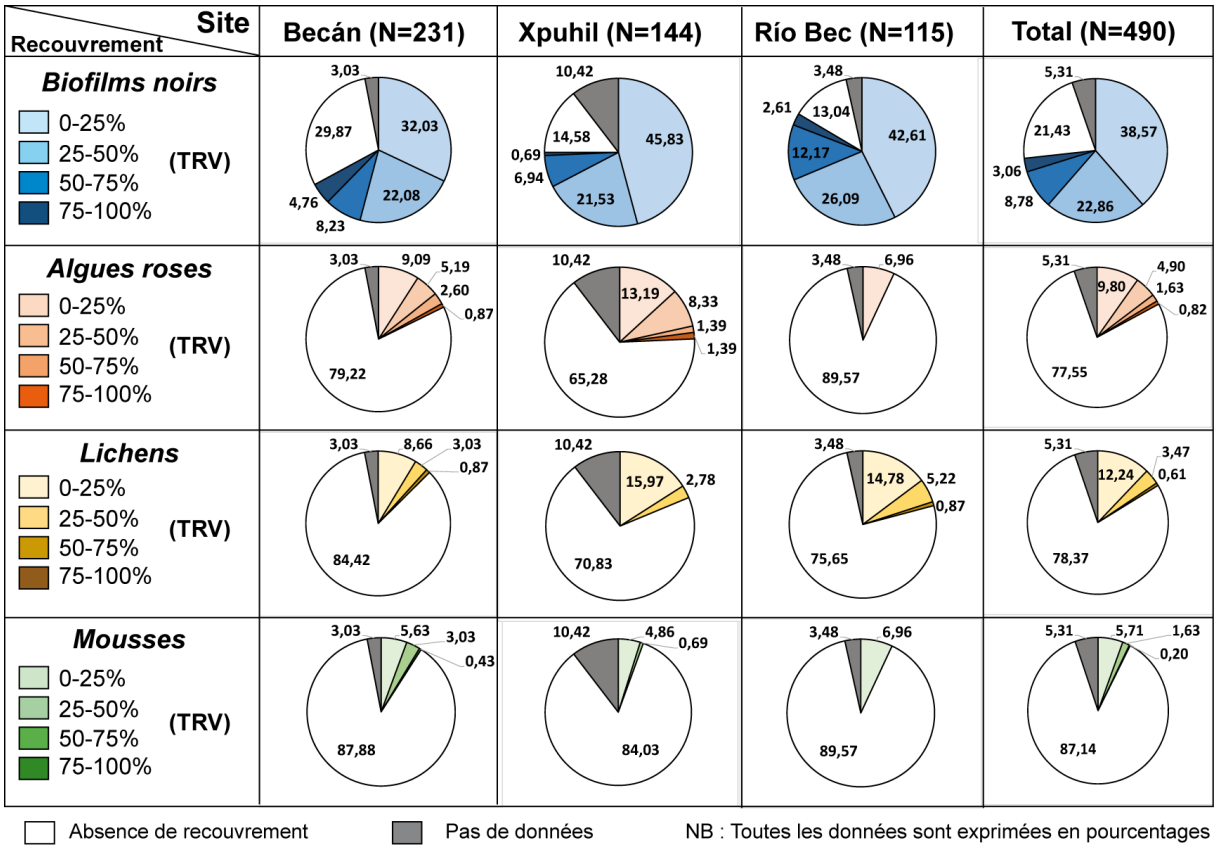


Fig. VI-6. Colonisation biologique par les différents organismes et taux de recouvrement (T.R.V.) relevés sur les structures étudiées.

Environ 75% des parements des structures étudiées sont recouverts par des biofilms noirs, contre seulement près de 15% par des algues roses ou des lichens, et à peine 8% par des mousses. Ces biofilms noirs représentent donc la majeure partie de la biomasse du secteur, avec cependant des taux de recouvrement très variables. En effet, près de 40% des parements ne sont recouverts qu'entre 0 et 25% de leur surface, 23% entre un quart et la moitié, environ 9% de la moitié aux trois quarts, et seulement 3% au-delà. C'est sur les sites de Becán et Río Bec que l'on trouve le plus de parements avec des taux de recouvrement importants – près de 15% sont colonisés sur plus de la moitié de leur surface – contre à peine 8% sur le site de Xpuhil. Néanmoins, si c'est à Río Bec que l'on trouve le plus de parements colonisés par ces biofilms noirs (seulement 13% d'absence), c'est à Becán que l'on en trouve le moins (près de 30% d'absence).

Si les patines algaires rosâtres ne sont pas un recouvrement majoritaire dans le secteur, leur présence sur 22% des parements des structures étudiées n'est pas négligeable, notamment à Xpuhil où le quart des parements sont colonisés par ces organismes. A l'inverse, seulement 7% le sont sur le site de Río Bec, avec des taux de recouvrement très bas. Comme pour les biofilms noirs, ces derniers sont variables sur l'ensemble du secteur : environ 10% des parements sont colonisés sur moins d'un quart de leur surface, 5% entre un quart et la moitié, et moins de 3% sur plus de la moitié. Les données relatives à la colonisation lichénique sont très similaires à celles qui concernent les algues roses, à la différence du site éponyme de Río Bec où les taux de recouvrement par les lichens sont bien supérieurs à ceux de ces dernières. La colonisation muscinale est quant à elle plus marginale, avec moins de 10% des parements colonisés et des taux de recouvrement très bas, à l'exception de Becán où quelques parements sont recouverts sur plus de la moitié de leur surface.

La colonisation biologique dans le secteur archéologique de Río Bec se caractérise par des recouvrements relativement importants qui concernent l'ensemble des sites étudiés dans des modalités variables. Le site de Becán semble être, tant au point de vue des signatures érosives qu'en termes de colonisation biologique, le plus représentatif des sites archéologiques du secteur, bien que les parements qui y ont été étudiés constituent près de la moitié du corpus. Cette première approche de la dynamique érosive sur les structures sélectionnées nous permet de dresser un « portrait » général des modalités de détérioration dans la zone d'étude. Cependant, le nombre et le type de variables relevées

impose un traitement statistique multivarié, afin d'identifier d'éventuelles corrélations et de disposer d'éléments d'interprétation plus robustes.

1.2. Analyses statistiques multivariées

Afin d'explorer plus en détail les données relatives à la dynamique érosive dans les sites archéologiques étudiés, une analyse des correspondances multiples (ACM) a été pratiquée sur une compilation des jeux de données obtenus sur les structures sélectionnées. Cette dernière regroupe, pour chaque parement des trois sites, la classification de la structure à laquelle il appartient, déterminée par l'anamnèse préalable, l'orientation et l'état de conservation des parements, les signatures érosives relevées, et le taux de recouvrement par chaque organisme identifié.

La classification selon l'anamnèse et l'état de conservation du parement, en tant que variables dites « expertes », ont été projetés sur l'espace factoriel en variables « illustratives » (aussi dites « supplémentaires ») afin que les éventuelles covariances excessives ne donnent pas lieu à des interprétations qui le seraient tout autant. Pour des raisons de lisibilité, l'espace factoriel construit par l'ACM a été décomposé pour chaque variable, afin d'avoir un meilleur aperçu des modalités prises par chaque individu (Fig. VI-8). Les axes F1 et F2 expliquent 59,47% de la variance totale du jeu de données, 43,75% pour F1 et 15,71% pour F2 (Fig. VI-7).

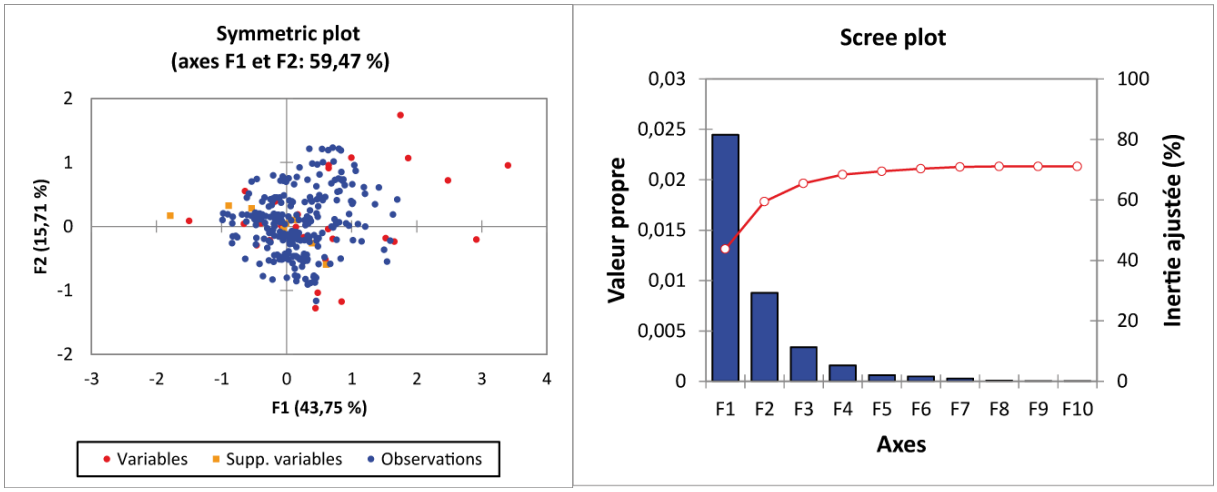


Fig. VI-7. Espace factoriel et *scree plot* de l'analyse des correspondances multiples pratiquée sur le jeu de données de l'ensemble des parements du secteur.

NB : (supp.) Les variables ont été projetées en tant que variables illustratives dans l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM).
( ) Pour les modalités entre parenthèses, les ellipses de confiance à 95% ne sont pas comprises dans la figure.

Fig. VI-8. Décomposition, pour chaque variable étudiée, de l'espace factoriel obtenu par ACM sur l'ensemble des parements des structures étudiées.

La décomposition de l'espace factoriel obtenu par ACM nous permet de comparer l'état de conservation et le classement d'anamnèse de chaque parement avec les modalités que prend ce dernier pour chaque variable étudiée. Dans un premier temps, on remarque qu'une majorité des parements en bon état ou peu détériorés appartiennent à des structures classées en anamnèse dans les groupes 1 et 3, sont majoritairement exposés au nord, et sont généralement des parements extérieurs des édifices. Cependant, il faut également noter en parallèle l'appartenance au groupe 1 d'un grand nombre de parements dont l'état de détérioration est avancé. Dans un second temps, il semble que la présence des différentes signatures érosives s'articule autour d'une logique particulière, assez semblable à celle de la progression de la détérioration des parements. En effet, la plupart des parements en bon état sont caractérisés par la présence de signatures relatives à la dissolution, les parements peu détériorés par celle des signatures relatives à la desquamation, les parements détériorés sont quant à eux corrélés à la présence supposée de délitage, et les parements très détériorés à celle de creusement. De même, la colonisation biologique semble elle aussi suivre une tendance particulière, avec une corrélation significative de taux de recouvrements importants par les biofilms noirs sur les expositions sud et ouest ainsi que sur les parements extérieurs, et par les algues roses, les lichens et les mousses sur les expositions nord. Les taux de recouvrement de ces trois derniers organismes semblent également se succéder, avec des taux très faibles de lichens corrélés à des taux faibles d'algues roses, des taux faibles de lichens corrélés à des taux importants d'algues roses et des taux très faibles de mousses, et ainsi de suite. On remarque enfin l'absence quasi-systématique des organismes sur les parements les plus détériorés, alors qu'un nombre important de parements en bon état présentent des taux de recouvrement élevés.

Au total, l'étude des parements du secteur archéologique Río Bec nous permet de distinguer certaines tendances générales dans les modalités de la détérioration à l'œuvre sur les structures étudiées, de disposer d'éléments de comparaison inter-sites, et d'identifier des corrélations nous permettant de discuter autour de l'activité et de l'intensité des processus érosifs et de leurs liens avec la colonisation biologique. En ce qui concerne les différents sites archéologiques étudiés, le site éponyme de Río Bec se distingue par un état de détérioration des parements globalement plus avancé, avec une présence significative de signatures érosives relatives au processus de délitage, et des taux importants de recouvrement par des biofilms noirs, et dans une moindre mesure par les lichens. Le site de Becán, quant à lui, se distingue par sa représentativité par

rapport aux valeurs moyennes obtenues sur les parements du secteur en termes de signatures érosives présentes et de colonisation biologique, bien qu'il s'agisse du site le moins colonisé par les micro-organismes. Enfin, les modalités de la détérioration sur le site de Xpuhil semblent se distinguer par une surreprésentation des signatures érosives relatives à la desquamation et au creusement, alors que celles relatives à la dissolution ont été beaucoup moins relevées que sur les autres sites. Au niveau de la colonisation biologique, Xpuhil se distingue par des taux de recouvrement par les algues roses relativement plus élevés.

Les analyses statistiques multivariées qui ont été pratiquées sur l'ensemble des données concernant les parements des structures étudiées ont donné lieu à trois résultats principaux. Premièrement, les parements des structures classées dans les groupes 1 et 3 en anamnèse – soit celles qui ont été dégagées depuis le plus longtemps – semblent en meilleur état de conservation. Cependant, le fait qu'un grand nombre de parements très détériorés soient également issus des structures du groupe 1 vient nuancer ce résultat. En outre, il ne se distingue pas de modalités de détérioration précises en fonction du classement des structures en anamnèse au niveau des signatures érosives relevées sur les parements. Deuxièmement, une certaine tendance a été identifiée dans les corrélations entre signatures érosives relatives à certains processus et état de conservation des parements. L'identification de cette tendance permet de disposer d'éléments d'interprétation afin de discuter d'éventuels relais et successions de processus érosifs à l'œuvre dans le secteur d'étude. Troisièmement, l'évaluation du rôle des micro-organismes pourra être discutée à l'aune des résultats montrant que les parements les plus colonisés sont loin d'être les plus détériorés. De plus, les analyses statistiques ont mis en évidence une probable succession végétale de certains organismes susceptibles de constituer des consortiums facilitant la colonisation de l'épiderme rocheux.

Le regard porté sur les parements des structures étudiées, tant à travers la spatialisation de la dynamique érosive qu'à l'appui des analyses statistiques, nous permet de disposer d'une vision d'ensemble des indices pouvant nous renseigner sur les modalités de la détérioration qui affecte les sites archéologiques sur l'ensemble du secteur. Dans le but d'affiner notre compréhension de ces dernières, il est néanmoins indispensable de réduire l'échelle d'analyse en s'intéressant à des éléments architecturaux plus réduits. C'est dans cette optique qu'après avoir cherché à définir les

modalités de l'érosion à l'échelle du secteur archéologique, avec les parements des structures étudiées, que nous allons maintenant nous pencher sur les éléments constitutifs des tours emblématiques du style architectonique Río Bec, sur la structure 5N2 du site éponyme.

2. Les tours de la structure 5N2 de Río Bec

Adossées aux extrémités orientale et occidentale de la façade nord de la structure 5N2 (Fig. VI-9), les tours jumelles typiques du style architectonique du secteur ont été construites au Classique terminal (Michelet *et al.*, 2013). A la différence de la tour centrale, munie d'un escalier et d'un temple sommital pleinement fonctionnels, les tours jumelles de la façade nord de l'édifice sont ornées de faux escaliers décoratifs et étaient surmontées de façades de temples simulées, au même titre que celles que l'on retrouve sur la structure 6N1 du groupe B.

Fig. VI-9. Les tours nord-est (a) et nord-ouest (b) de la structure 5N2 à Río Bec.

Chaque tour est composée de plusieurs corps, dont six subsistent, chacun d'eux étant encadré par une moulure basale et une corniche en saillie. Les observations ont été restreintes à la face nord, qui est celle où ces éléments constitutifs sont les plus présents. La chronologie des dégagements et des interventions varie en fonction des différents corps (Fig. VI-10), ce qui permet, en évaluant leur état de détérioration, de pouvoir discuter de leur conservation en fonction de la durée de leur exposition aux agents

atmosphériques et des interventions dont les différentes portions des tours ont fait l'objet.

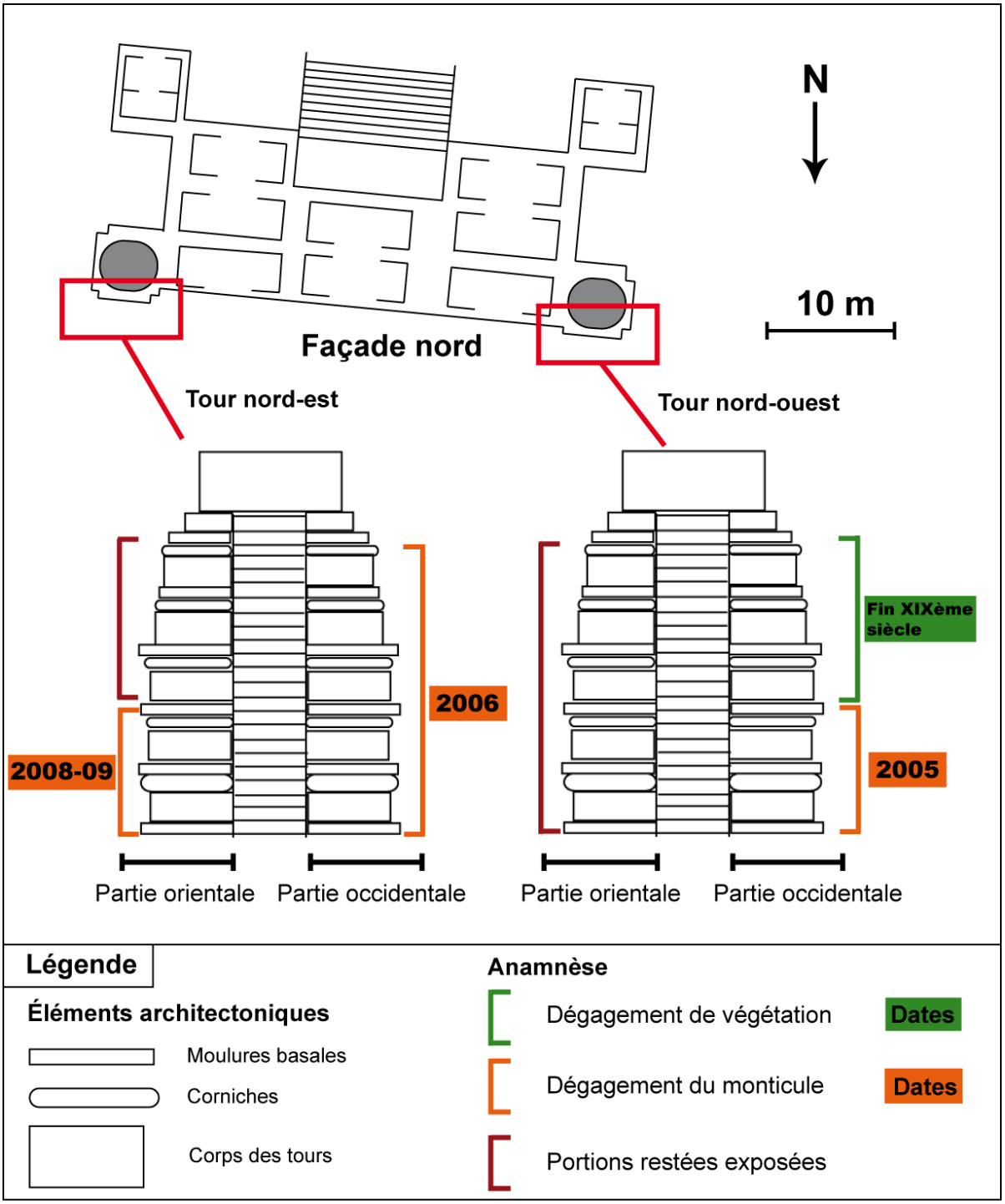


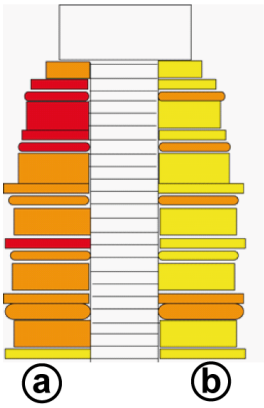
Fig. VI-10. Chronologie des interventions sur les différents éléments constitutifs des tours jumelles de la structure 5N2 à Río Bec.

De la même manière que pour les parements du secteur archéologique, les différents éléments architecturaux ont été étudiés *in situ* avec pour chacun d'entre eux

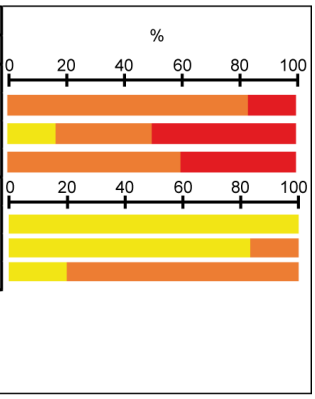
une évaluation de leur état de conservation. De plus, ces données pourront être comparées aux quantifications photogrammétriques effectuées sur les corps des deux tours, et qui sont présentées dans le chapitre suivant. Les parties orientale et occidentale des tours jumelles n'ayant pas la même chronologie d'intervention, les données les concernant seront présentées séparément. Nous présenterons ici les résultats individuellement pour chaque tour, en commençant par la tour nord-est.

2.1. La tour nord-est

L'évaluation de l'état de conservation des éléments constitutifs de la tour nord-est montre une opposition nette entre les parties occidentale et orientale de cette dernière (Fig. VI-11).



		Tour nord-est				
		1	2	3	4	ND
Partie orientale						
a	Corps	0	5	1	0	0
	Moulures	1	2	3	0	0
	Corniches	0	3	2	0	0
Partie occidentale						
b	Corps	6	0	0	0	0
	Moulures	5	1	0	0	0
	Corniches	1	4	0	0	0



Bon état (1) | Peu détérioré (2) | ND
Détérioré (3) | Très détérioré (4)

Fig. VI-11. Évaluation de l'état de conservation des éléments architecturaux de la tour nord-est de la structure 5N2 à Río Bec.

La détérioration des matériaux de construction semble plus avancée sur la partie orientale de la tour, notamment sur les moulures (50% classées en « détérioré ») et sur les corniches (40% classées en « détérioré »). Seule la première moulure, à la base de la tour, est bien conservée. Inversement, les éléments en bon état de conservation prédominent sur la partie occidentale, où la détérioration n'est avancée que sur les corniches, et dans une moindre mesure (80% classées en « peu détérioré »).

2.2. La tour nord-ouest

L'opposition remarquée précédemment se retrouve également sur la tour nord-ouest, toutefois de manière plus nuancée, et à l'inverse : la partie orientale semble mieux conservée que la partie occidentale (Fig. VI-12).

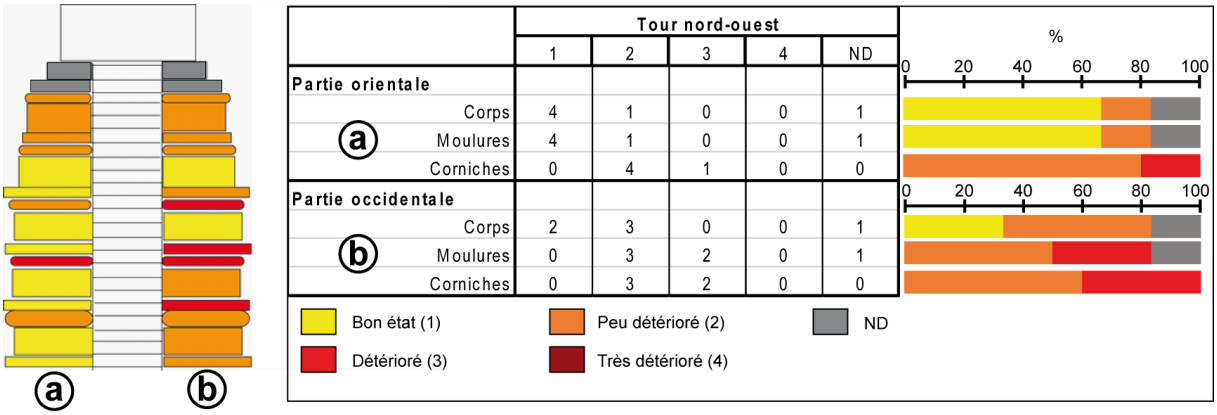


Fig. VI-12. Évaluation de l'état de conservation des éléments architecturaux de la tour nord-ouest de la structure 5N2 à Río Bec.

En effet, les éléments de la partie orientale sont considérés en « bon état » pour plus de 60% des corps et des moulures, même si le constat est plus nuancé pour les corniches dont aucune n'est en « bon état » et dont un élément est classé dans la catégorie « détérioré ». Pour la partie occidentale, l'état de conservation est correct sur les corps, plus inquiétant sur les moulures (25% classées en « détérioré »), et les corniches (40% classées en « détérioré »). Certaines données n'ont pu être collectées en haut de la tour pour des raisons d'accessibilité.

Au total, l'étude des tours jumelles de la structure 5N2 a donné lieu à deux principaux résultats. Premièrement, on remarque une opposition assez claire entre les parties des tours se trouvant dans les angles de la structure – soit la partie orientale de la tour nord-est et la partie occidentale de la tour nord-ouest – et les parties directement adjacentes à la structure principale de l'édifice, ces dernières étant généralement mieux conservées. Deuxièmement, les différents éléments architecturaux constitutifs des tours jumelles ne se retrouvent pas aujourd'hui dans des états de conservation semblables, en particulier les moulures et les corniches, qui sont généralement moins bien conservées que les corps des tours. Ces résultats nous offrent des éléments d'interprétation que nous pourrons discuter à l'appui des résultats de quantification de l'érosion, afin de déterminer l'impact des facteurs anthropiques, bioclimatiques, ou morphostructuraux qui commandent cette opposition et la spatialité des régimes d'érosion. Par la suite, en continuation de l'affinement de nos travaux vers d'autres éléments architecturaux, nous poursuivrons la présentation des résultats ayant trait au diagnostic de la dynamique érosive par les données obtenus sur le mur de la structure V-A de Becán.

3. Le mur de la structure V-A de Becán

La structure V-A se situe à l'entrée du site archéologique de Becán, au nord-ouest de la structure IV (Fig. VI-13) et a été dégagée par Messenger en 1974 (Messenger, 1975) et consolidée par Bueno en 1985 et 1992 (Bueno Cano et Gutierrez, 1985 ; Bueno Cano *et al.*, 1992). La chambre la plus méridionale de cette structure a éveillé notre attention en raison d'une spatialité marquée de l'état de conservation du parement occidental.

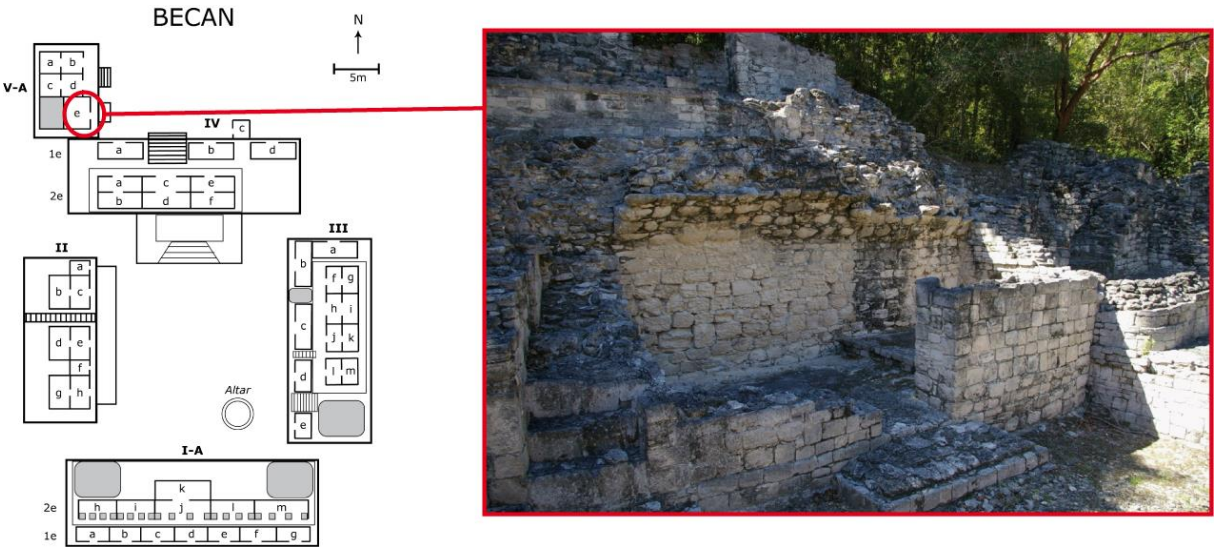


Fig. VI-13. Localisation du mur de la structure V-A à Becán.

En effet, on distingue visuellement sur ce mur trois parties distinctes en termes d'état de conservation, de morphologie architecturale, et de recouvrement biologique (Fig. VI-14). La partie A, située en contrebas d'une demi-voûte bien reconstruite, inclinée à environ 60° par rapport au contact avec le parement, est dans un état de détérioration avancé, alors que les parties B et C, situées en contrebas d'une demi-voûte réduite sont mieux conservées, la partie B se distinguant par une colonisation biologique extensive par un biofilm noir.

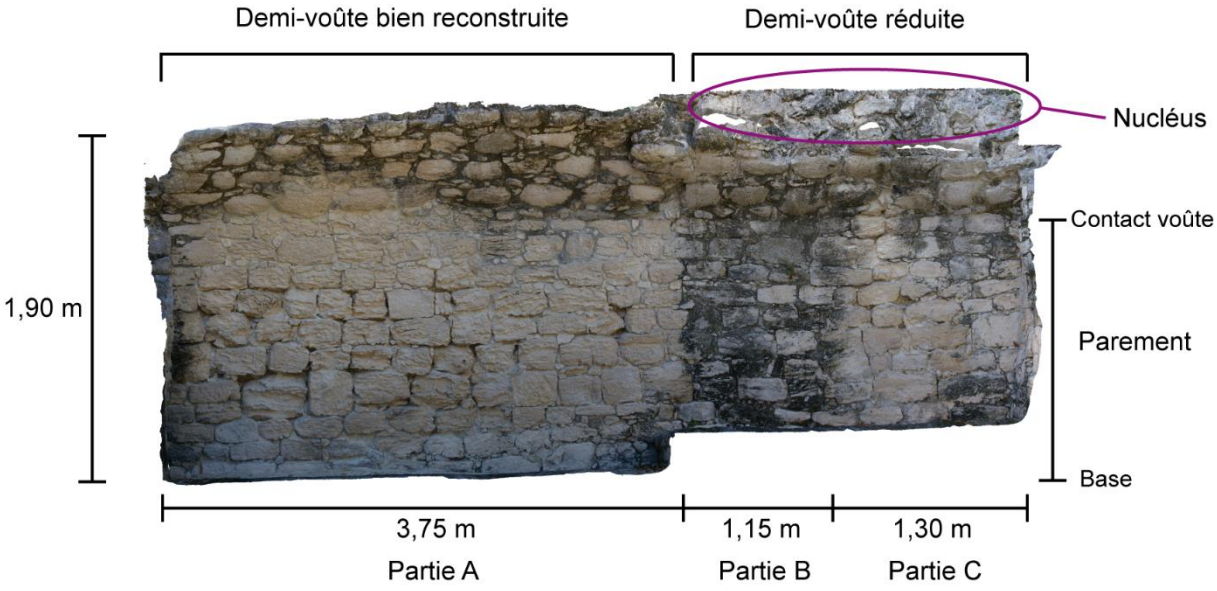


Fig. VI-14. Dimensions, morphologie et parties distinctes identifiées sur le mur de la structure V-A à Becán.

Afin de discriminer de potentiels régimes d'érosion distincts, éventuellement commandés par la morphologie du mur en question, l'intégralité des blocs a été étudiée, et leur état de conservation ainsi que les signatures érosives relatives à différents processus ont été relevés. Les données ont ensuite été intégrées à un système d'information géographique afin de spatialiser les résultats, et analysées statistiquement.

3.1. Spatialisation des résultats

L'état général de détérioration du mur de la structure V-A est avancé, avec près de la moitié des blocs qui le constituent classés dans les catégories « détérioré » ou « très détérioré », et à peine 10% en « bon état » (Fig. VI-15).

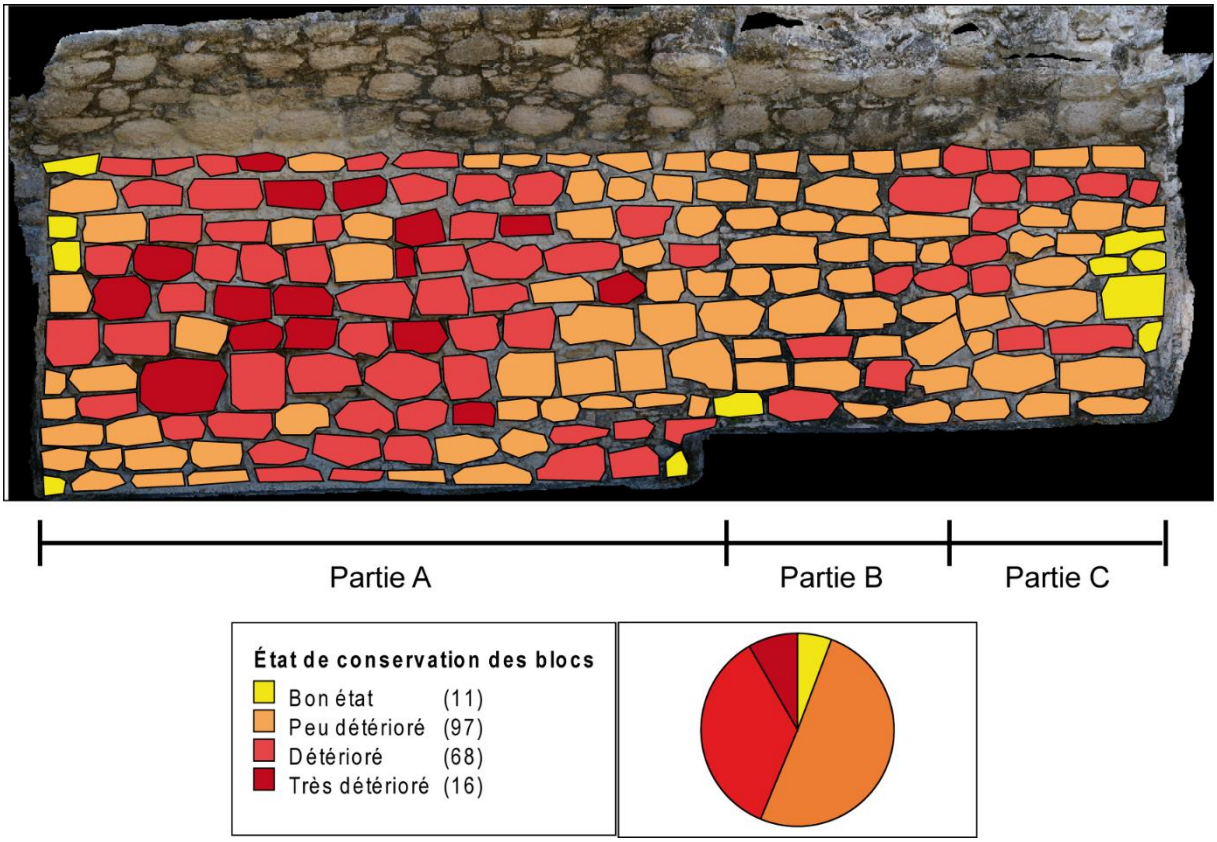


Fig. VI-15. Spatialisation de l'état de conservation des blocs du mur de la structure V-A de Becán.

En termes de logiques spatiales, on remarque que les rares blocs en bon état se trouvent aux extrémités du parement, là où il y a contact avec les parements adjacents. Si la plupart des blocs les plus érodés semblent se concentrer sur la partie méridionale du parement (à gauche sur la figure), on ne distingue pas de logique verticale apparente, et aucun de ces blocs détériorés ou très détériorés ne se trouve isolé, ce qui induit une certaine polarisation des régimes de détérioration accélérée.

En termes d'analyse de l'activité des processus, on remarque que peu de blocs comportent des signatures érosives relatives à la dissolution (moins de 10%), dont la majorité se localisent sur la partie basse du parement et près du point de contact avec la voûte (Fig. VI-16).

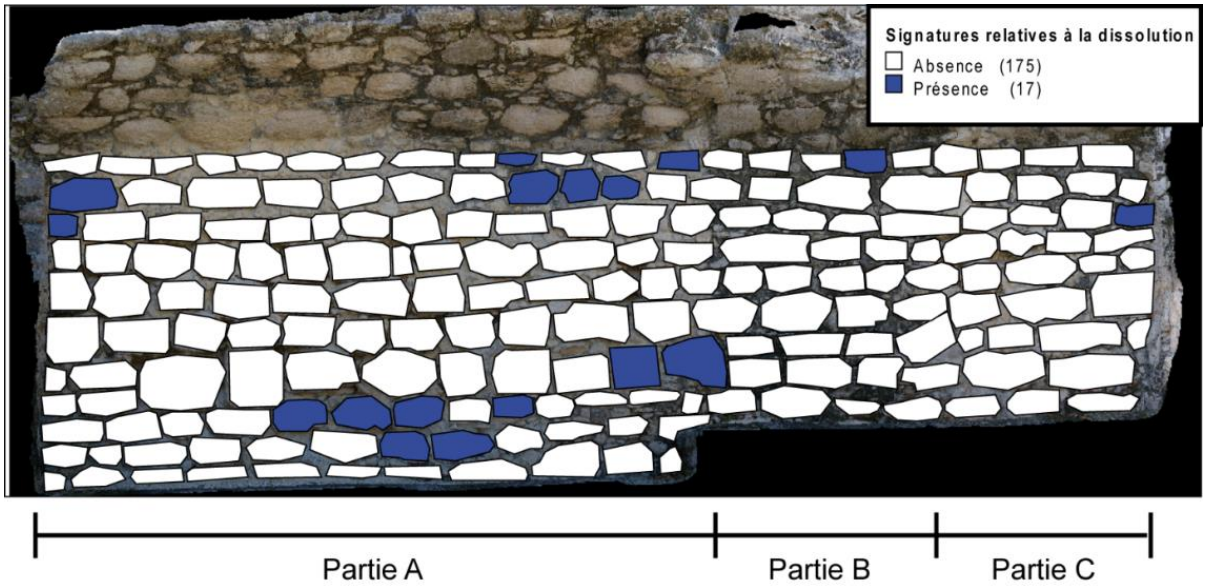


Fig. VI-16. Spatialisation des signatures érosives relatives à la dissolution sur le mur de la structure V-A de Becán.

Le creusement semble avoir affecté un peu plus de 10% des blocs du parement, avec une logique spatiale plutôt polarisée, notamment au centre de la partie méridionale et au contact de la voûte (Fig. VI-17).

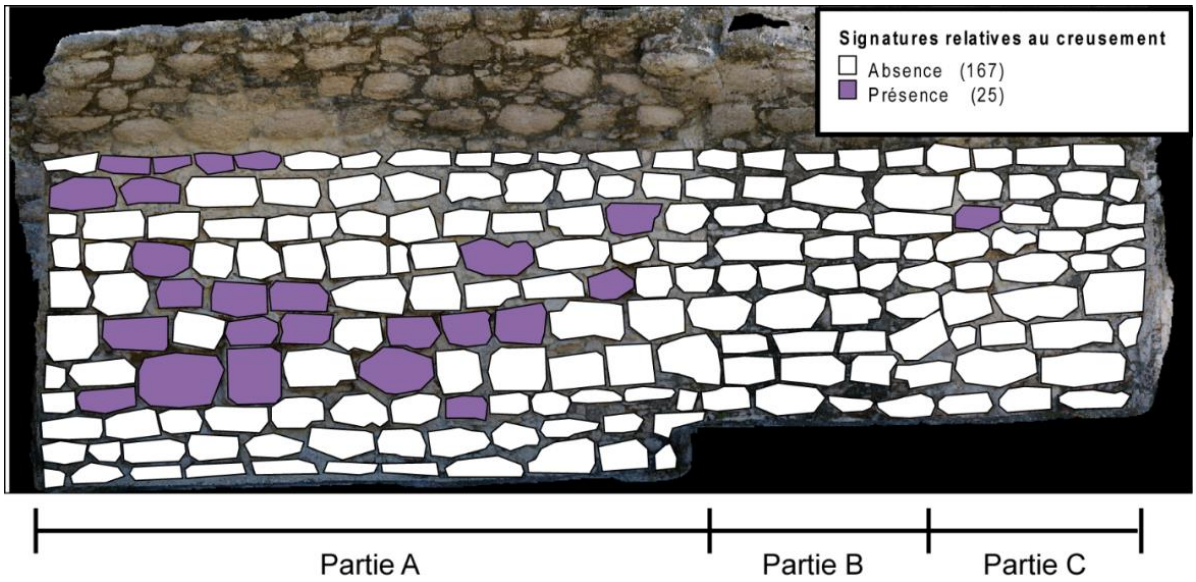


Fig. VI-17. Spatialisation des signatures érosives relatives au creusement sur le mur de la structure V-A de Becán.

Beaucoup plus observées, les signatures relatives au délitage sont présentes sur plus de la moitié des blocs du parement, de manière plutôt regroupée, peu de blocs affectés se retrouvant isolés. Le délitage semble toucher autant les parties basses et

hautes du parement, épargnant seulement quelques sections de mur, notamment au centre de la partie B et en haut de la partie C (Fig. VI-18).

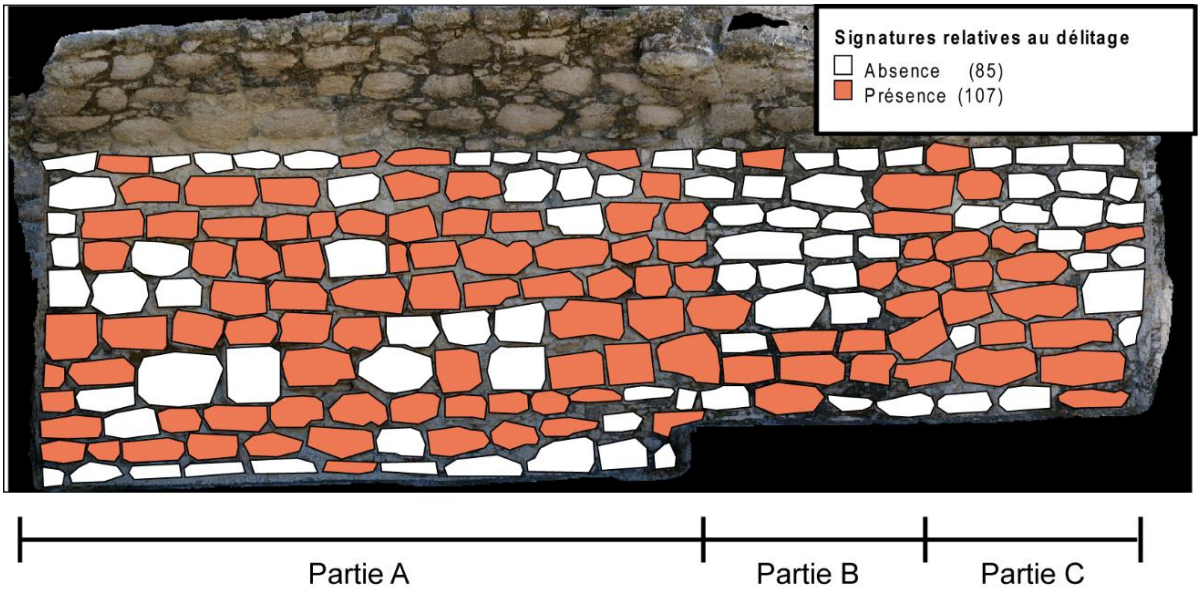


Fig. VI-18. Spatialisation des signatures érosives relatives au délitage sur le mur de la structure V-A de Becán.

Enfin, les signatures relatives à la desquamation sont les plus largement observées (environ les deux tiers des blocs), et concernent l'ensemble du parement, notamment à la base de ce dernier et dans la zone de contact avec la voûte (Fig. VI-19).

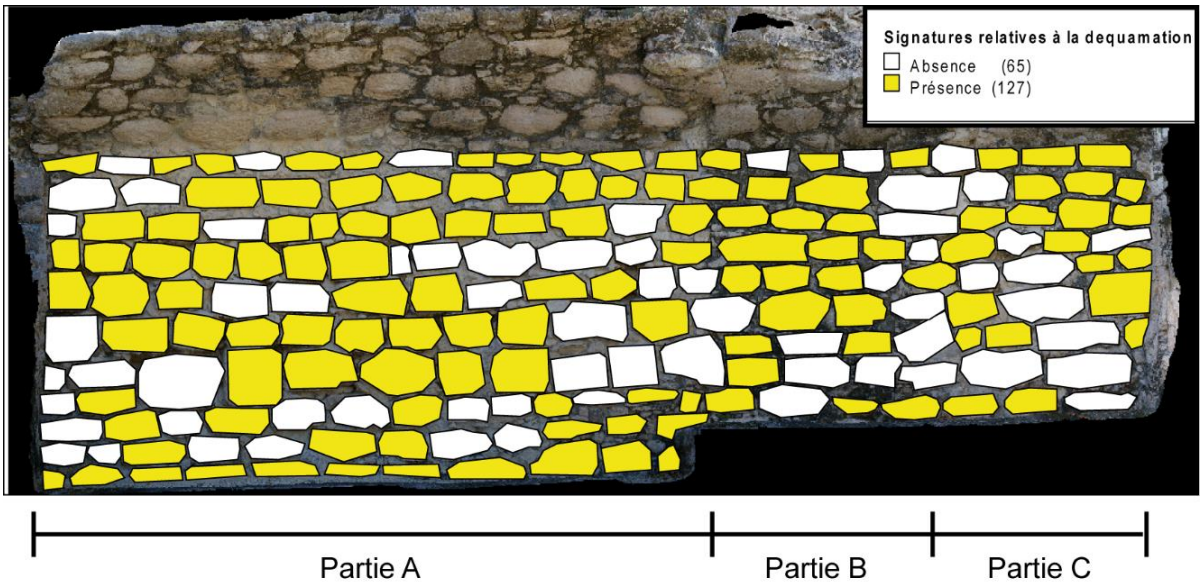


Fig. VI-19. Spatialisation des signatures érosives relatives à la desquamation sur le mur de la structure V-A de Becán.

Au-delà de la spatialisation de l'état de conservation des blocs constitutifs du parement de la structure V-A de Becán et des signatures érosives que l'on peut observer

sur ces derniers, une approche statistique supplémentaire est nécessaire afin de tirer de ces résultats de véritables éléments de discussion.

3.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques, au même titre que le travail de spatialisation, concernent d'une part l'état de conservation des blocs du parement en fonction (Fig. VI-20), et d'autre part les signatures érosives relatives à l'activité des processus (Figs. VI-21 et VI-22). En revanche, nous cherchons ici à distinguer une potentielle variabilité en fonction des différentes parties identifiées sur le parement, définies par la morphologie architecturale et les recouvrements biologiques.

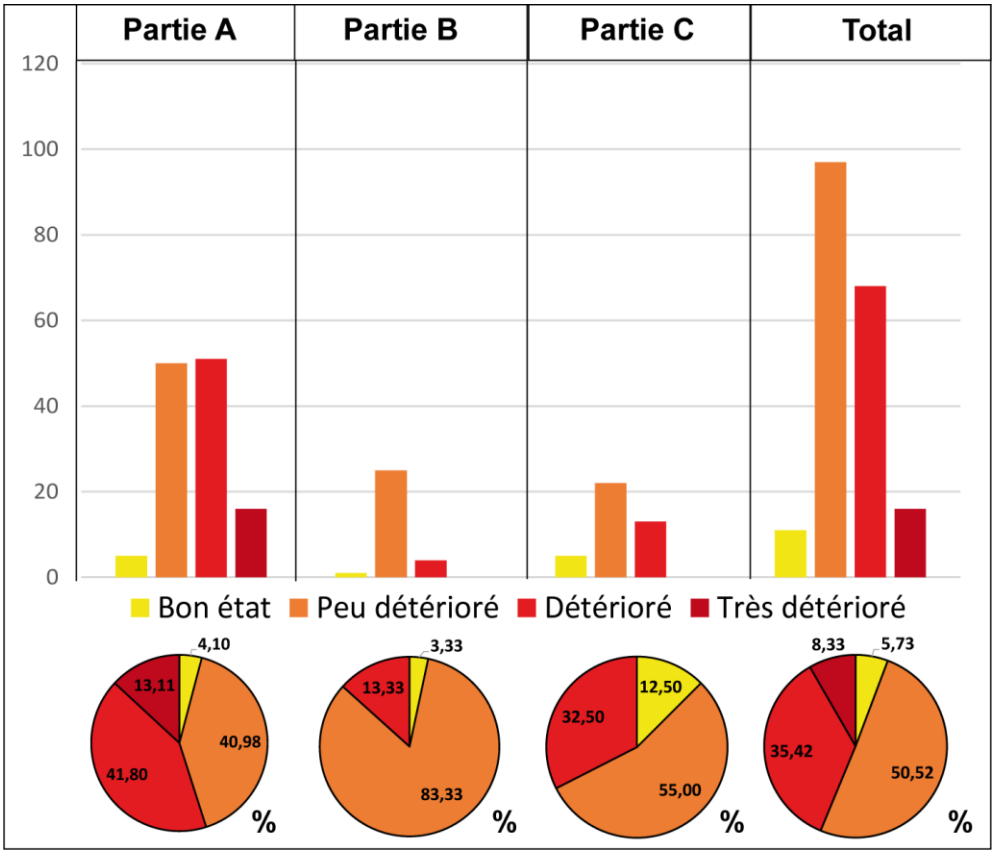


Fig. VI-20. Comparaison de l'état de conservation des parements en fonction des différentes parties de parement identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán.

En effet, l'état de conservation des blocs du parement est relativement hétérogène selon les différentes parties identifiées. La partie A présente les niveaux de détérioration les plus importants, avec près de la moitié des blocs classés dans les catégories « détérioré » et « très détérioré », ainsi qu'une minorité (4%) évalués en « bon état ». Le profil de cette partie est, même si cette dernière représente près des deux tiers de

l'échantillon, très similaire au profil général du parement, à l'exception des blocs classés dans la catégorie « peu détérioré » à laquelle la partie B contribue bien plus largement. En effet, près de 80% des blocs de la partie B sont classés dans la catégorie « peu détérioré » et l'ensemble des observations est très hétérogène, avec seulement 13% de blocs détériorés et aucun bloc très détérioré. On retrouve sur la partie C un profil plus similaire au profil général et à la partie A. Si c'est sur cette section que l'on observe le plus de blocs en bon état, aucun ne se classant en « très détérioré », on en trouve également un pourcentage important dans la modalité « détérioré » (près du tiers). La conservation des matériaux serait donc meilleure sur la partie du parement surmontée d'une demi-voûte réduite, en particulier sur la section recouverte par un biofilm noir, et leur détérioration serait plus accentuée en contrebas de la demi-voûte plus largement reconstruite. En termes de signatures relatives aux différents processus érosifs, les différentes parties identifiées montrent également des profils nuancés (Fig. VI-21).

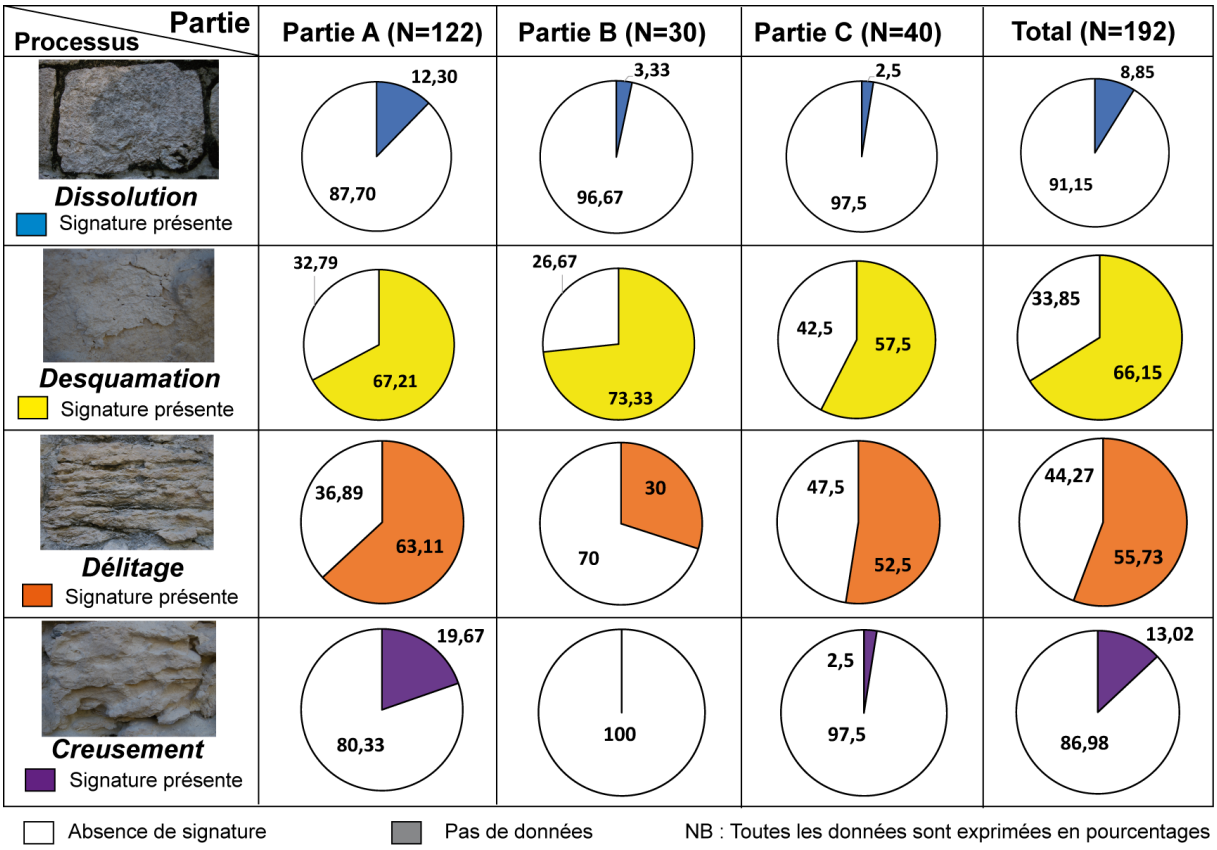


Fig. VI-21. Comparaison des signatures érosives observées sur les différentes parties identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán.

La partie A se caractérise par une prédominance des signatures relatives à la desquamation et au délitage, qui concernent les deux tiers des blocs du parement. On remarque également une importance significative du creusement (20% des blocs), mais

aussi de la dissolution (12%), comparativement aux autres sections. La partie B est marquée par une prédominance des signatures relatives à la desquamation, présentes sur les trois quarts des blocs, et par une sous-représentation des autres processus (30% pour le délitage, 3% pour la dissolution, et aucune trace de creusement). Enfin, la partie C se caractérise quant à elle par le peu de signatures relatives à la dissolution et au creusement, et par des taux moyens en ce qui concerne les autres processus. Cependant, il convient de rappeler que si les signatures érosives peuvent se superposer et se masquer entre elles lorsque certains processus entraînent des pertes de matière plus importantes, un certain nombre de blocs présentent aussi simultanément des traces d'activité de plusieurs d'entre eux. La figure VI-22 illustre à ce propos les corrélations, négatives en l'occurrence, que certains processus entretiennent entre eux sur les blocs du parement étudié.

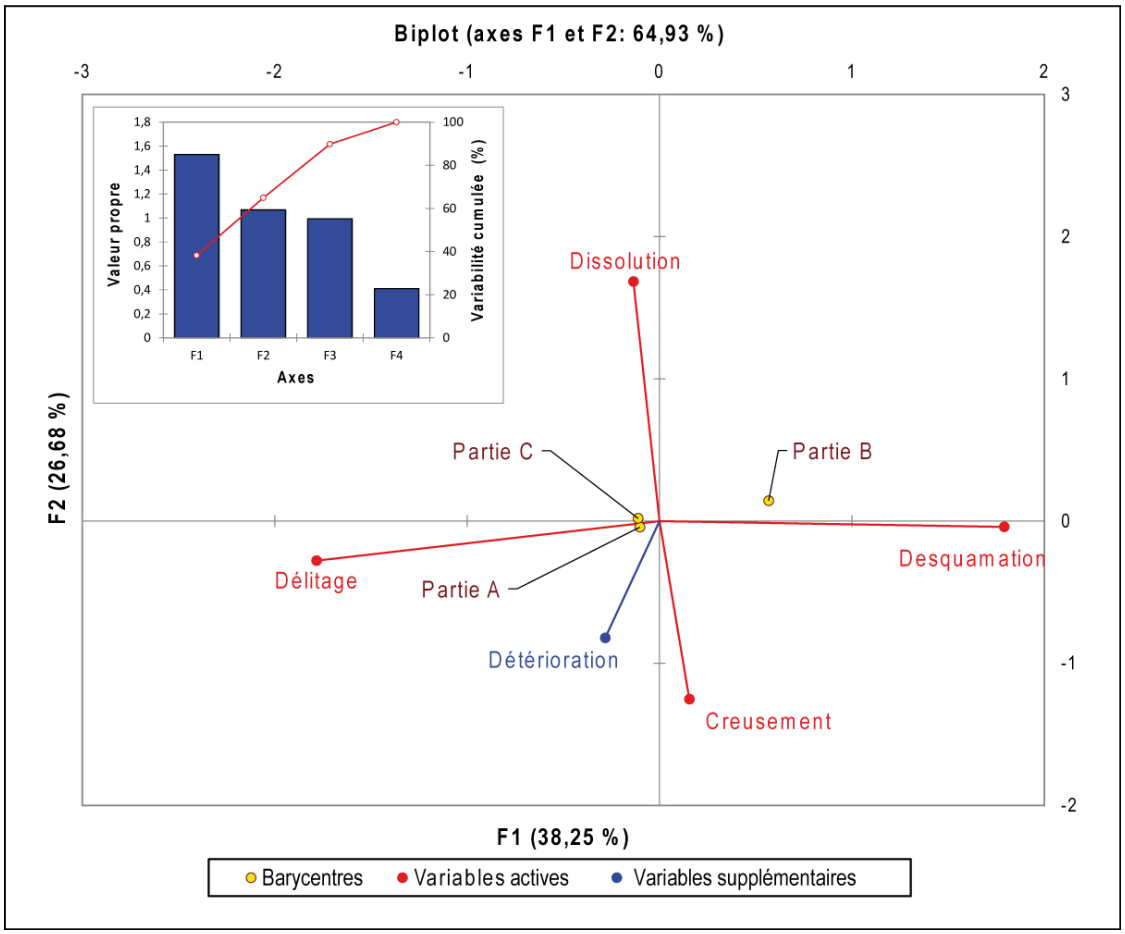


Fig. VI-22. Analyses en composantes principales des variables étudiées sur les blocs du mur de la structure V-A de Becán.

On remarque en effet une opposition nette entre d'une part les variables dissolution et creusement, et d'autre part entre les variables délitage et desquamation, les blocs présentant des signatures relatives à l'un des processus ont donc tendance à ne

pas présenter de trace d'activité de l'autre processus. Par ailleurs, il semble que, comme cela a été évoqué dans les précédentes analyses statistiques multivariées, les niveaux de détérioration les plus avancés soient ici aussi corrélés positivement aux signatures érosives des processus de délitage et de creusement. En ce qui concerne les différentes parties identifiées sur le mur en question, projetées ici en variables qualitatives supplémentaires, on remarque que la partie B se distingue particulièrement des parties A et C, qui se positionnent, elles, très proches l'une de l'autre sur l'espace factoriel. Ces deux dernières paraissent donc très similaires en termes de modalités de détérioration, que ce soit par l'intensité de l'érosion des matériaux, indiquée par la variable « détérioration », ou par les processus à l'œuvre, dominés sur ces deux parties par le délitage et le creusement. La partie B se distingue donc par un niveau de détérioration moins avancé et une représentation plus importante des signatures érosives relatives à la dissolution et à la desquamation.

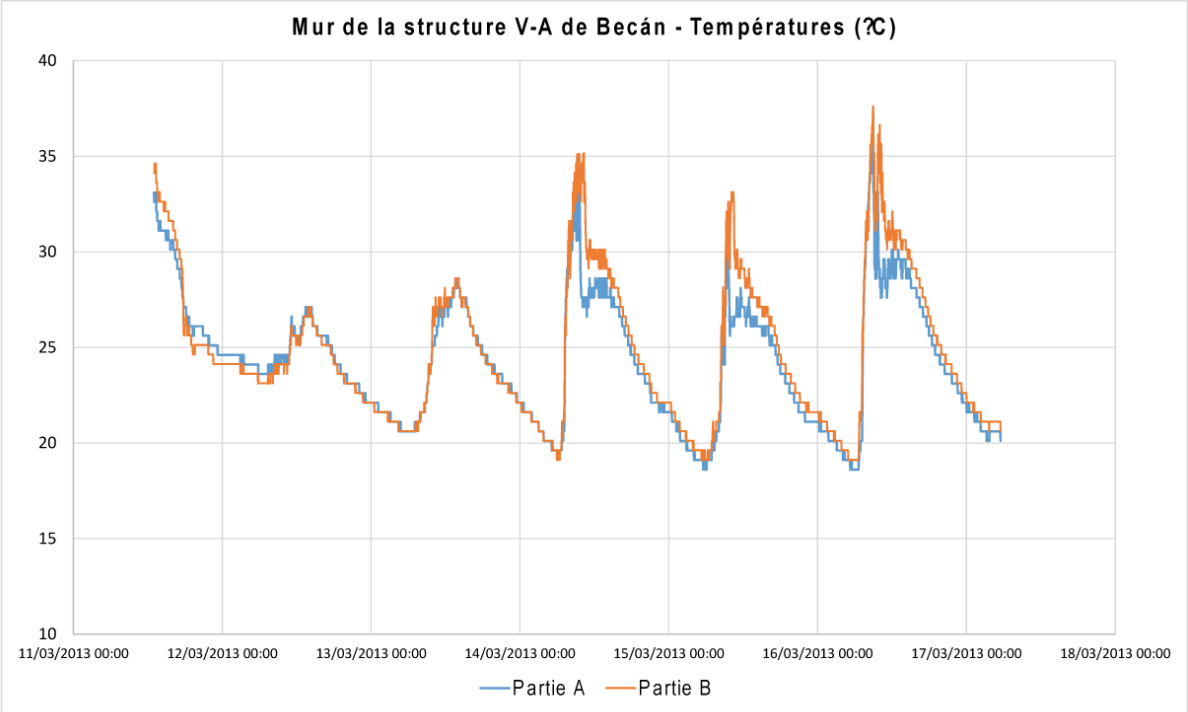
Afin de compléter notre étude de ce parement nous intéressant à bien des égards, il a également été jugé pertinent de collecter des données relatives aux paramètres climatiques dans lesquels les différentes parties vont évoluer.

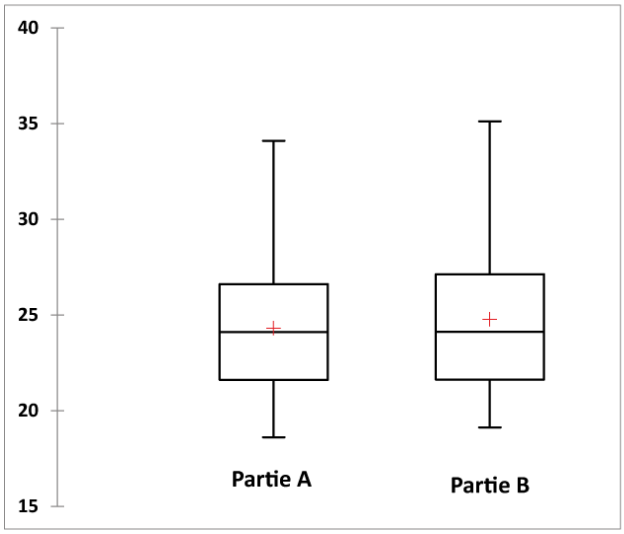
3.3. Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques ont été enregistrés sur les parties A et B du mur de la structure V-A de Becán. La partie C n'a pas pu être monitorée en raison du nombre limité de capteurs disponibles. La stratégie de collecte de données est la même que celle employée pour la caractérisation des facteurs de contrôle, avec un enregistrement hygrothermique sur une semaine, et une mesure sur une année entière. Le premier a été analysé pour identifier de potentielles variations dans les paramètres climatiques en fonction des différentes sections du parement, la seconde afin de travailler sur le couplage des deux variables au cours d'une année complète, tenant ainsi compte des variations saisonnières.

Lors des deux premiers jours d'enregistrement, au cours desquels la météo était pluvieuse, on remarque une évolution concomitante des températures sur les deux parties du parement (Fig. VI-23). Du 14 au 17 mars en revanche, les températures tombent plus bas (de 3 à 4°C) et plus tôt dans la journée (environ deux heures avant) sur la partie A que sur la partie B. Les amplitudes thermiques observées varient également

selon la section du parement, la température minimale enregistrée est supérieure de 0,5°C, la température maximale de 2°C, et la température moyenne de 0,47°C sur la partie B. Enfin, les tests de Wilcoxon et de Mann-Whitney confirment la différence significative des deux échantillons.





	Partie A	Partie B
Observations	4096	4096
Minimum	18,610	19,120
Maximum	35,600	37,610
Médiane	24,110	24,130
Moyenne	24,300	24,770
Variance (n-1)	10,759	14,194
Écart-type (n-1)	3,280	3,768

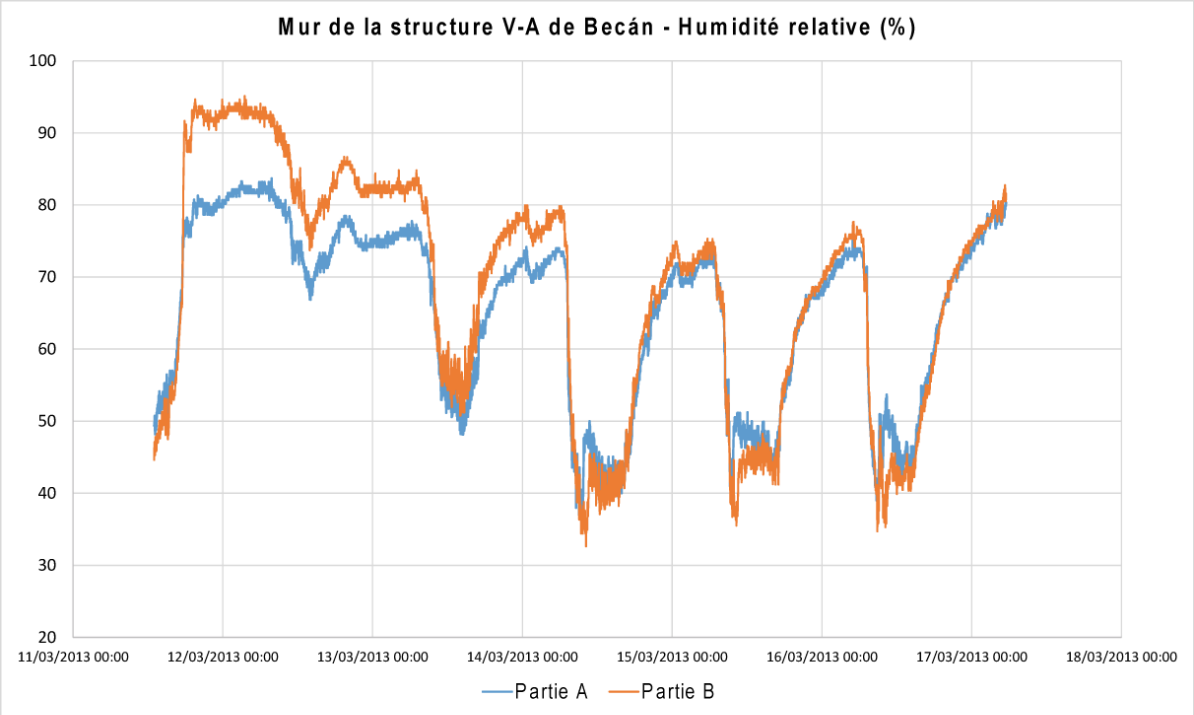
Test de Wilcoxon : valeur-p < 0,0001

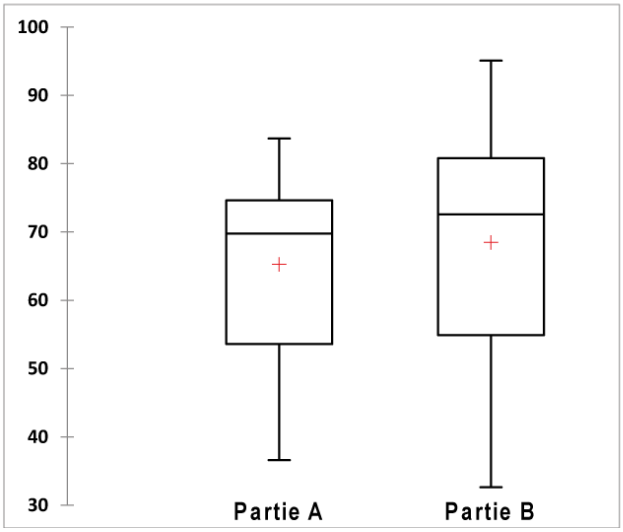
Test de Mann-Whitney : valeur-p < 0,0001

Fig. VI-23. Comparaison des températures enregistrées pendant la semaine du 11 au 17 mars 2013 sur le mur de la structure V-A de Becán.

En ce qui concerne les données d'humidité (Fig. VI-24), c'est lors des jours pluvieux – du 11 au 13 mars inclus – que les différences entre les deux parties sont les plus marquées, avec jusqu'à 10% d'humidité en plus enregistrés sur la partie B. Du 14 au 17 mars, lors des journées ensoleillées, on retrouve une évolution concomitante et de

faibles écarts, notamment au cours des nuits, les jours se caractérisant par une humidité relative un peu moins importante sur la partie A. Les amplitudes hygrométriques sont quant à elles plus grandes sur la partie B. Si le taux minimal enregistré est supérieur de 4% sur la partie A, le taux maximal enregistré est supérieur de 12% et le taux moyen de 3% sur la partie B, avec un écart-type plus important de 4%. Ici encore, les tests statistiques de Wilcoxon et de Mann-Whitney confirment que la différence entre les échantillons est significative.





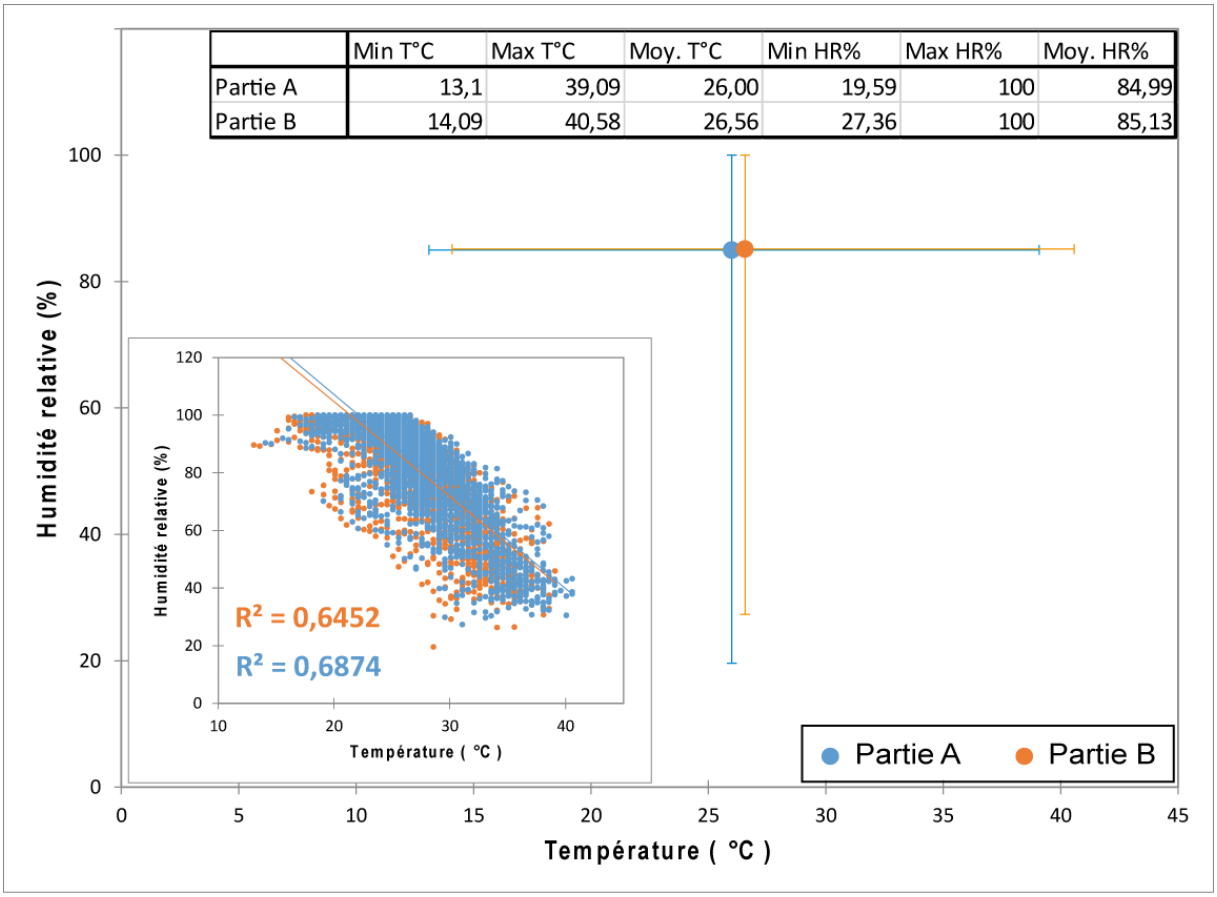
	Partie A	Partie B
Observations	4096	4096
Minimum	36,620	32,620
Maximum	83,690	95,090
Médiane	69,760	72,570
Moyenne	65,251	68,458
Variance (n-1)	153,105	267,766
Écart-type (n-1)	12,374	16,364

Test de Wilcoxon : valeur-p < 0,0001

Test de Mann-Whitney : valeur-p < 0,0001

Fig. VI-24. Comparaison des taux d'humidité relative enregistrés pendant la semaine du 11 au 17 mars 2013 sur le mur de la structure V-A de Becán.

Le couplage hygrothermique des données récoltées sur une année complète (Fig. VI-25) montre que la partie B est globalement plus chaude que la partie A avec une température moyenne enregistrée supérieure de 0,5°C, et plus humide avec notamment un taux minimal supérieur de 8%.



	Min T°C	Max T°C	Moy. T°C	Min HR%	Max HR%	Moy. HR%
Partie A	13,1	39,09	26,00	19,59	100	84,99
Partie B	14,09	40,58	26,56	27,36	100	85,13

Fig. VI-25. Couplage des données enregistrées pendant une année complète sur les différentes parties du mur de la structure V-A de Becán.

Si la variabilité des paramètres climatiques enregistrés sur les différentes parties du parement en question n'est pas aussi significative que sur de précédentes opérations où nous avions comparé diverses structures ou expositions, elle reste pour le moins importante pour des enregistrements effectués à moins de deux mètres d'intervalle sur le même mur, avec une exposition similaire. L'intérêt porté au mur de la structure V-A de Becán nous a permis de souligner d'une part la variabilité spatiale de l'état de conservation des blocs le constituant ainsi que des signatures érosives pouvant y être relevés, et d'autre part de mettre en évidence celle des ambiances microclimatiques dans lesquelles les différentes parties du parement évoluent. Ainsi, nous serons en mesure de discuter autour des impacts de la morphologie structurale induite par les interventions humaines sur de potentiels régimes d'érosion différenciés à quelques mètres d'intervalle.

Après nous être intéressés à l'ensemble des parements du secteur, puis aux corps des tours de la structure 5N2 de Río Bec et aux blocs du mur de la structure V-A de Becán, nous terminons notre diagnostic de la dynamique érosive par les panneaux à damiers emblématiques du style architectonique du secteur.

4. Les panneaux à damiers

Les panneaux à damiers sont des éléments iconographiques typiques du style Río Bec. On les retrouve – en bon état de conservation et en nombre suffisant – sur la structure II de Becán (Fig. VI-26) et sur la structure 6N1 du site éponyme (Fig. VI-27). Ils sont constitués de blocs taillés en carrés d'une dizaine de centimètres de côté insérés en quinconce dans des panneaux en retrait dans les parements, encadrés de blocs de pierres taillées.

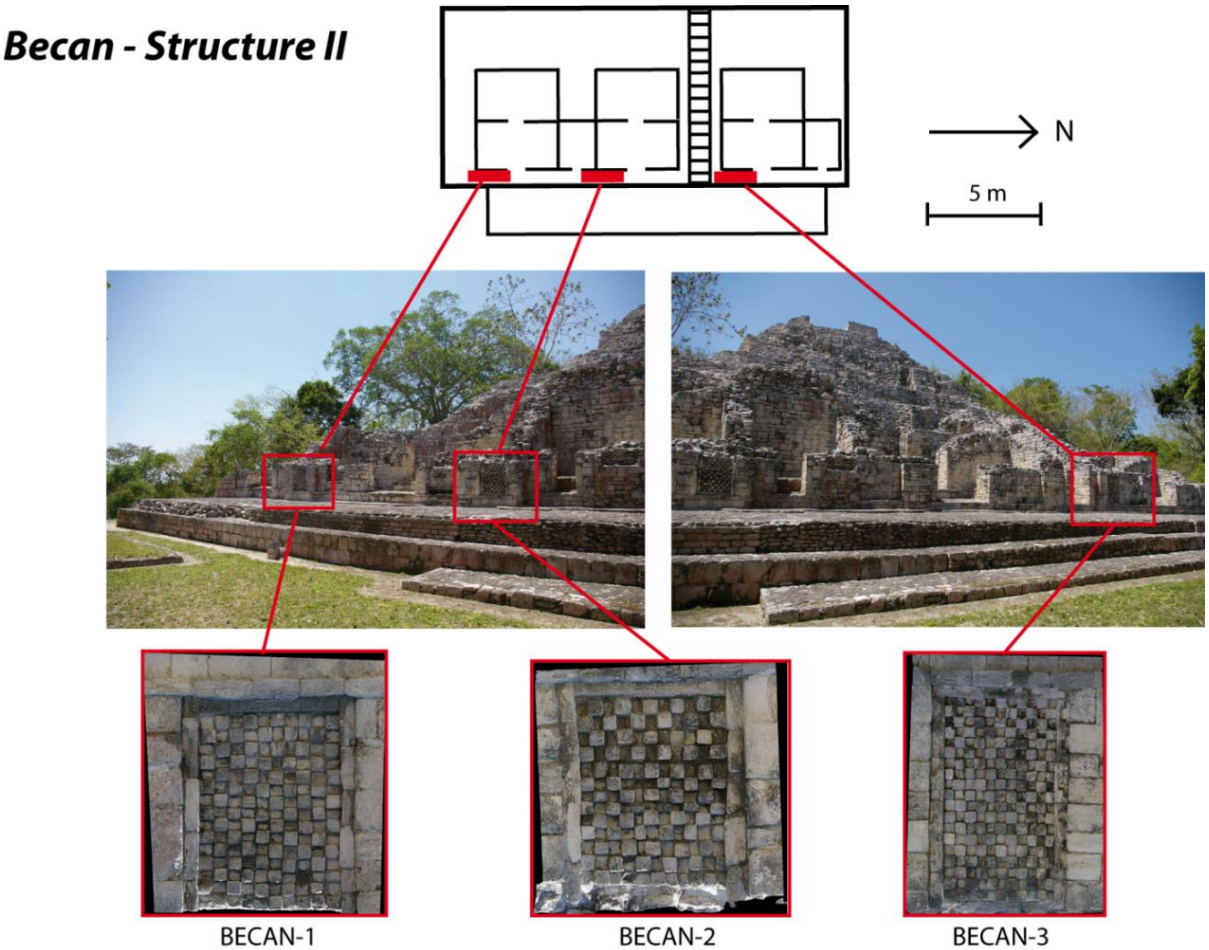


Fig. VI-26. Localisation et aperçu des panneaux à damiers de la structure II de Becán.

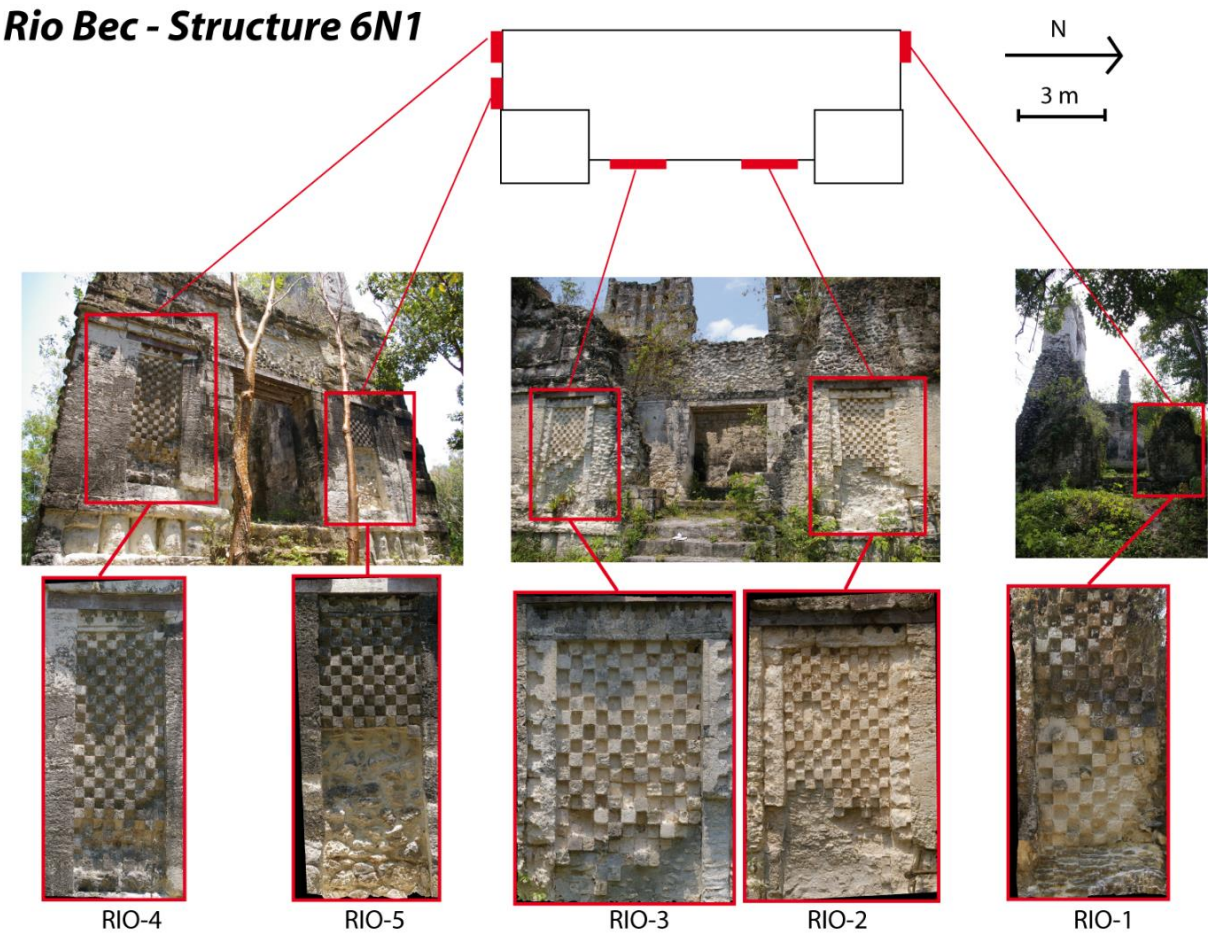


Fig. VI-27. Localisation et aperçu des panneaux à damiers de la structure 6N1 de Río Bec.

Ce type d'éléments iconographiques répétitifs permet l'obtention de données sur les modalités de détérioration les affectant. Les degrés d'érosion chimique, basé sur l'arrondi des angles des blocs et les signatures associées aux processus de dissolution, et d'érosion mécanique, basé sur l'apparition de fractures, d'éclatements et les pertes de matière des blocs, ont été mesurées afin de déterminer le poids de chaque ensemble de processus associés dans la détérioration des éléments constitutifs de ces panneaux. Les résultats ont d'abord été spatialisés panneau par panneau, puis analysés statistiquement.

4.1. Spatialisation des résultats

La spatialisation des résultats obtenus nous permet d'étudier la distribution spatiale des différents degrés d'érosion chimique (de C1 à C5) et d'érosion mécanique (de M1 à M5) sur les blocs des différents panneaux. Cet aperçu de la distribution spatiale des modalités de détérioration est susceptible de nous fournir des éléments d'interprétation en fonction de l'environnement immédiat dans lequel les panneaux

s'inscrivent. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux panneaux de la structure II de Becán (Fig. VI-28).

Fig. VI-28. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la structure II de Becán.

Sur BEC-01, le panneau méridional de la structure II de Becán, une large majorité de blocs présente des degrés d'érosion peu avancés (de C1 à C2) à l'exception de trois blocs classés en C3. La détérioration chimique est plus avancée sur la partie supérieure du panneau. L'érosion mécanique est quant à elle plus avancée sur la moitié inférieure droite dont la totalité des blocs sont classés en M2 et M3, et sur quelques blocs de la partie supérieure, avec deux blocs en M5. Les blocs du panneau médian de la structure II de Becán, BEC-02, présentent quant à eux un degré d'érosion chimique globalement plus avancé sur la partie inférieure du panneau. Les degrés d'érosion mécanique relevés se distribuent en revanche d'une manière beaucoup plus aléatoire, avec plusieurs pôles de détérioration plus avancée, notamment au centre et sur la partie inférieure droite du panneau. Enfin, le panneau septentrional de la structure concernée, BEC-03, est celui dont les blocs présentent les degrés d'érosion, chimique comme mécanique, les plus homogènes sur l'ensemble de l'élément iconographique, sans qu'aucune partie ne se distingue par une détérioration plus avancée.

Sur la structure 6N1, le panneau RIO-01 (Fig. VI-29), le seul présent sur la façade nord de l'édifice, est un de ceux dont le moins de blocs subsistent. Les blocs restant se distinguent par des degrés d'érosion chimique et mécanique plus avancés sur la partie inférieure du panneau.

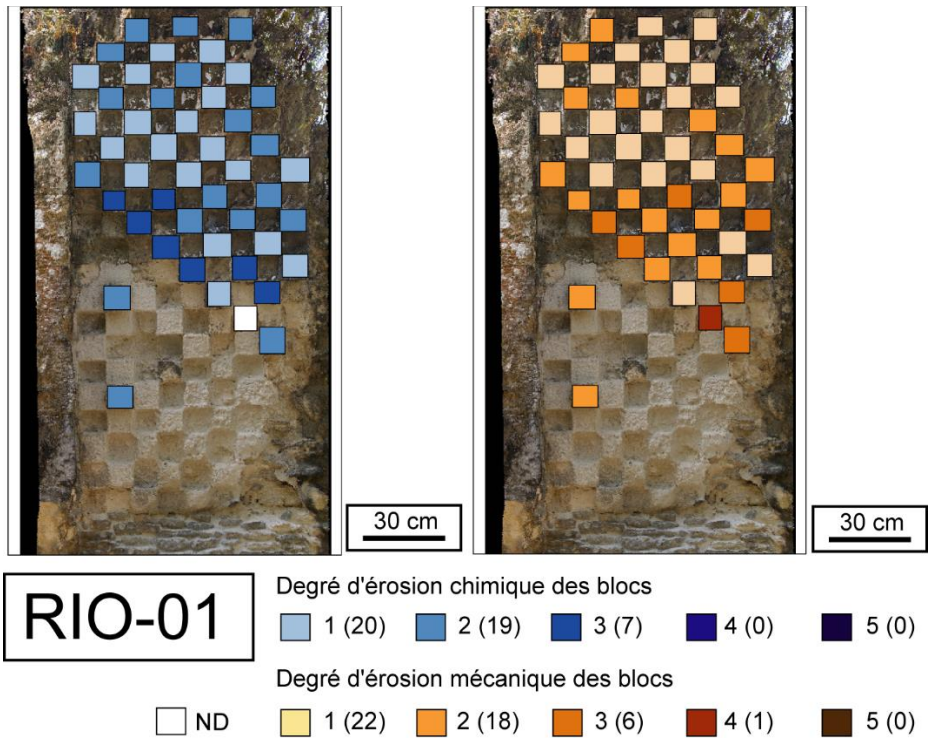


Fig. VI-29. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur le panneau RIO-01.

Sur la façade orientale de la structure 6N1 de Río Bec, les panneaux RIO-02 et RIO-03 encadrent la porte d'accès principale de l'édifice (Fig. VI-30). Les blocs du panneau de RIO-02 présentent un degré d'érosion chimique plutôt homogène, tandis que des valeurs extrêmes d'érosion mécanique se retrouvent majoritairement sur la partie supérieure du panneau, malgré un degré relativement avancé sur l'extrémité inférieure droite. Sur le panneau RIO-03, on note une nette opposition, tant en termes d'érosion chimique que d'érosion mécanique, entre la partie supérieure, moins affectée, et la partie inférieure qui présente des degrés de détérioration plus avancés.

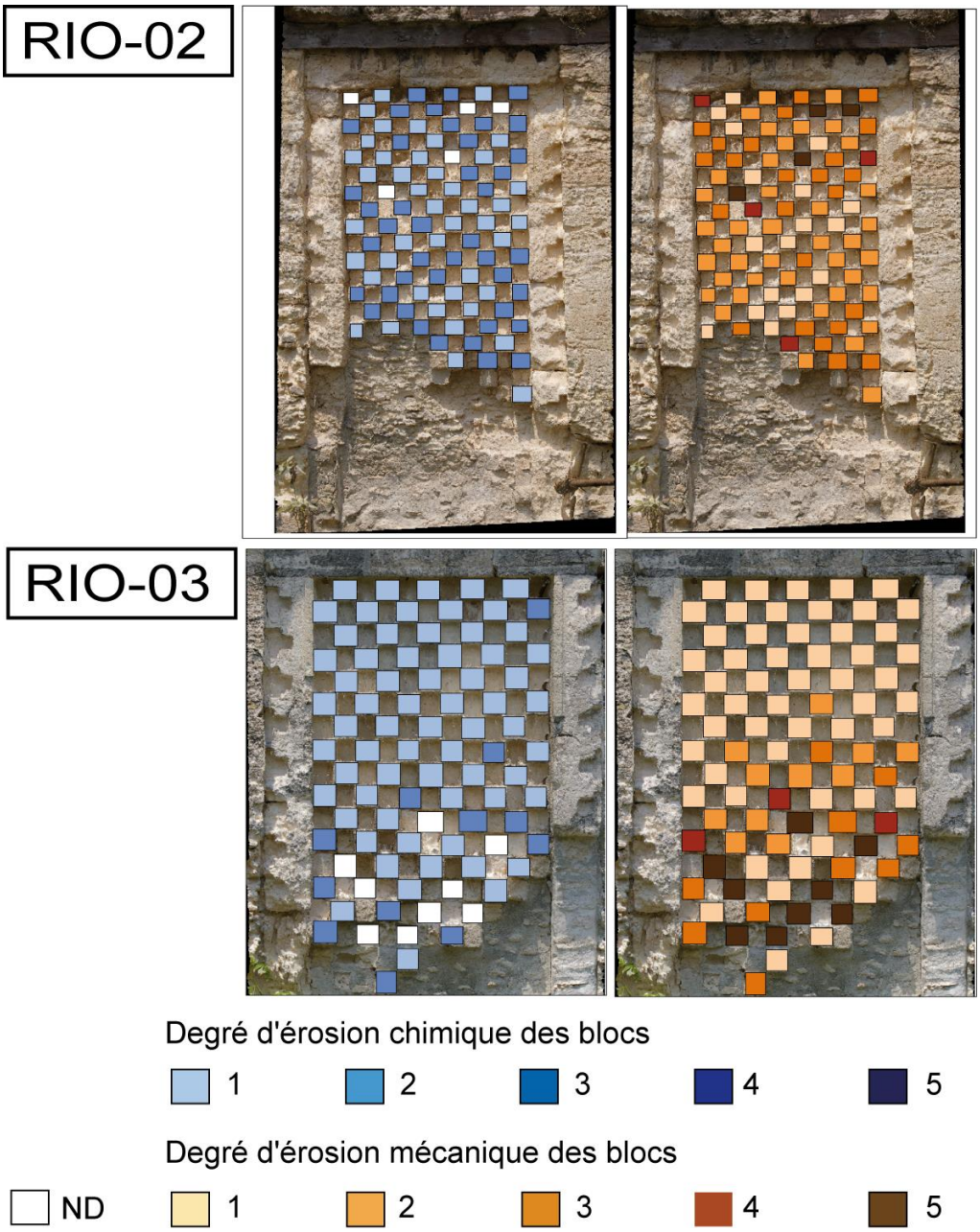


Fig. VI-30. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la façade orientale de la structure 6N1 de Río Bec.

Les panneaux à damiers RIO-04 et RIO-05 se situent sur la façade sud de la structure 6N1 de Río Bec (Fig. VI-31). Sur le panneau RIO-04, on remarque un degré d'érosion chimique très avancé de trois rangées de blocs complétement éclatés sur la partie inférieure, alors que la partie supérieure présente des degrés de détérioration peu avancés. Le panneau RIO-05, quant à lui, est celui dont les blocs présentent les degrés d'érosion les moins avancés parmi tous les panneaux étudiés. En dehors de certains blocs situés sur la partie supérieure, l'ensemble des éléments se retrouvent dans un bon état de conservation.

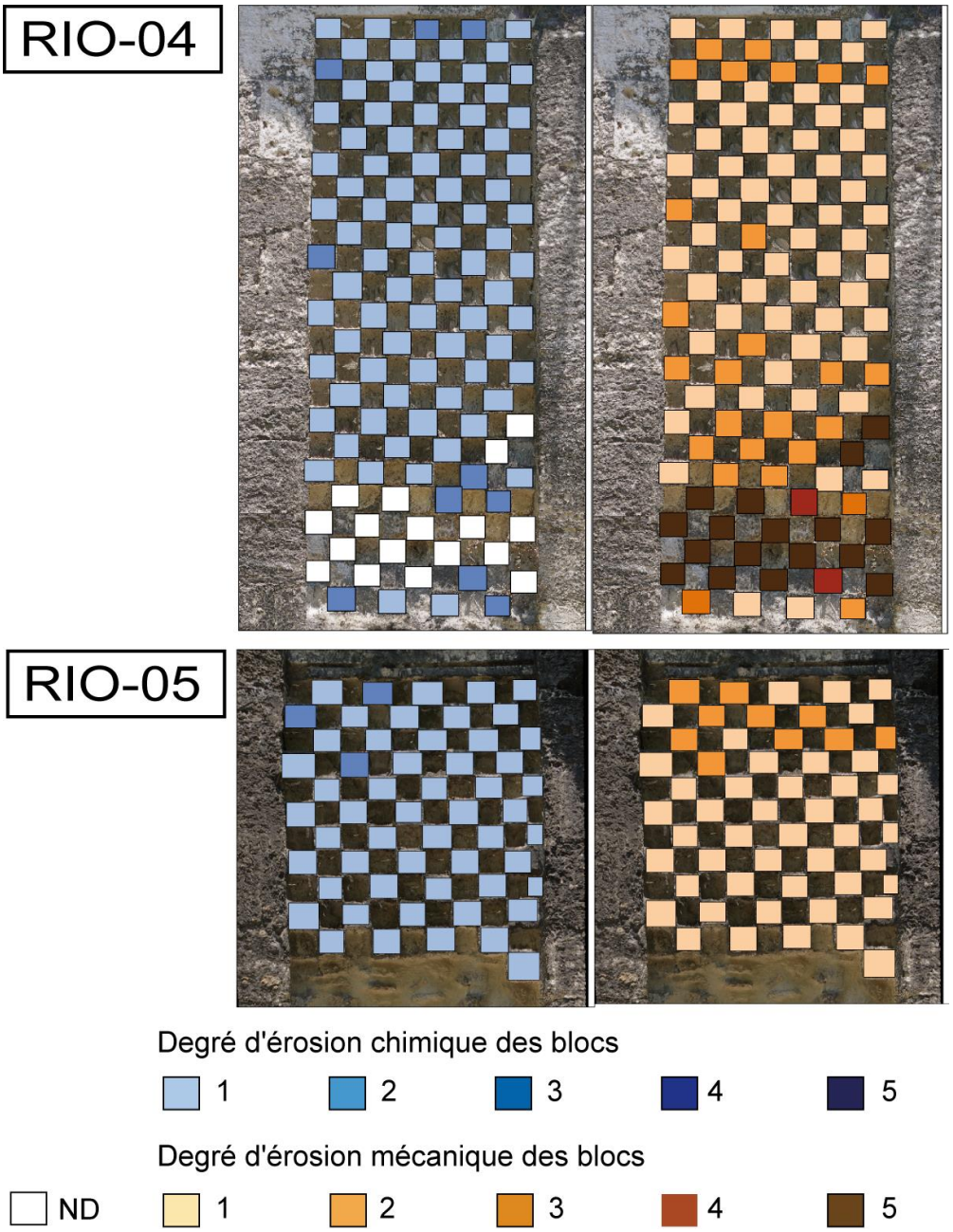


Fig. VI-31. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la façade sud de la structure 6N1 de Río Bec.

Au total, la spatialisation des résultats montre qu'il n'existe pas de tendance particulière pour les panneaux à damiers de Becán au niveau de la distribution spatiale des degrés d'érosion chimique et mécanique des blocs. En revanche, sur RIO-01, on remarque que les blocs subsistant sur la partie inférieure présentent des degrés de détérioration plus avancés. En ce qui concerne la façade orientale de 6N1 à Río Bec, il existe un contraste entre l'homogénéité de la distribution spatiale des degrés d'érosion de RIO-02 et la nette opposition entre les parties supérieures et inférieures de RIO-03. Enfin, les panneaux RIO-04 et RIO-05, situés sur la façade sud de la même structure, présentent une certaine similitude de la distribution spatiale des degrés d'érosion dans leur partie supérieure. En dehors de ce dernier point, il est difficile de distinguer de réelles similitudes de spatialisation des degrés d'érosion sur des panneaux situés dans les mêmes contextes d'intervention et dans les mêmes ambiances microclimatiques – *i.e.* sur la même façade d'une même structure. Il est donc nécessaire d'entreprendre des analyses statistiques afin d'identifier des tendances susceptibles de nous fournir des éléments d'interprétation.

4.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques présentées ici visent à calculer les pourcentages de chaque degré d'érosion évalué (Tab. VI-1) afin de pouvoir comparer les profils d'érosion chimique (Fig. VI-32) et mécanique (Fig.VI-33) de chaque panneau à damiers. Ensuite, une analyses en composantes principales a été effectuée, en intégrant les variables ayant trait à la colonisation biologique, afin d'identifier des ressemblances et les dissemblances entre les différents panneaux.

Panneau	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	ND	Total	Moyenne (σ)	Médiane	Blocs
BEC-01	48	44	5,33	0	0	2,67	100	1,56 (0,60)	2	75
BEC-02	30,98	56,34	9,86	0	0	2,82	100	1,73 (0,68)	2	71
BEC-03	35,58	63,46	0	0	0	0,96	100	1,64 (0,48)	2	104
RIO-01	42,55	40,43	14,89	0	0	2,13	100	1,78 (0,74)	2	47
RIO-02	47,77	46,67	0	0	0	5,56	100	1,49 (0,50)	1	90
RIO-03	75,58	13,95	0	0	0	10,47	100	1,16 (0,37)	1	86
RIO-04	75	9,26	0	0	0	15,74	100	1,11 (0,31)	1	108
RIO-05	94,55	5,45	0	0	0	0	100	1,05 (0,23)	1	55
Panneau	**M 1**	**M 2**	**M 3**	**M 4**	**M 5**	**ND**	**Total**	**Moyenne (σ)**	**Médiane**	**Blocs**
BEC-01	17,33	57,33	22,67	0	2,67	0	100	2,13 (0,79)	2	75
BEC-02	18,31	66,19	11,27	1,41	2,82	0	100	2,04 (0,78)	2	71
BEC-03	6,73	74,04	18,27	0	0,96	0	100	2,14 (0,56)	2	104
RIO-01	46,81	38,29	12,77	2,13	0	0	100	2,89 (1,72)	2	47
RIO-02	20,01	44,44	26,67	4,44	4,44	0	100	2,29 (0,99)	2	90
RIO-03	61,63	12,79	11,63	3,49	10,46	0	100	1,88 (1,35)	1	86
RIO-04	58,33	22,22	1,85	1,85	15,75	0	100	1,94 (1,45)	1	104
RIO-05	81,82	18,18	0	0	0	0	100	1,18 (0,39)	1	55

Tab. VI-1. Calcul des pourcentages pour chaque d'érosion chimique et mécanique sur l'ensemble des panneaux à damiers étudiés.

En ce qui concerne les profils d'érosion chimique (Fig. VI-32), on remarque une similitude des profils des panneaux situés à Becán, présentant près de la moitié des blocs classés en C1 et l'autre moitié en C2, les blocs restants étant classés en C3. En outre, on observe sur les panneaux de ce site une légère progression de la détérioration d'origine chimique de BEC-03 vers BEC-01, en passant par BEC-02. RIO-01 quant à lui se distingue par un profil d'érosion chimique parmi les plus avancés de tous les panneaux étudiés, avec le plus haut pourcentage de blocs classés en C3 au sein du corpus étudié. Enfin, on remarque une forte similitude des profils de RIO-03, RIO-04 et RIO-05, avec plus de 75% de blocs classés en C1 et le reste en C2.

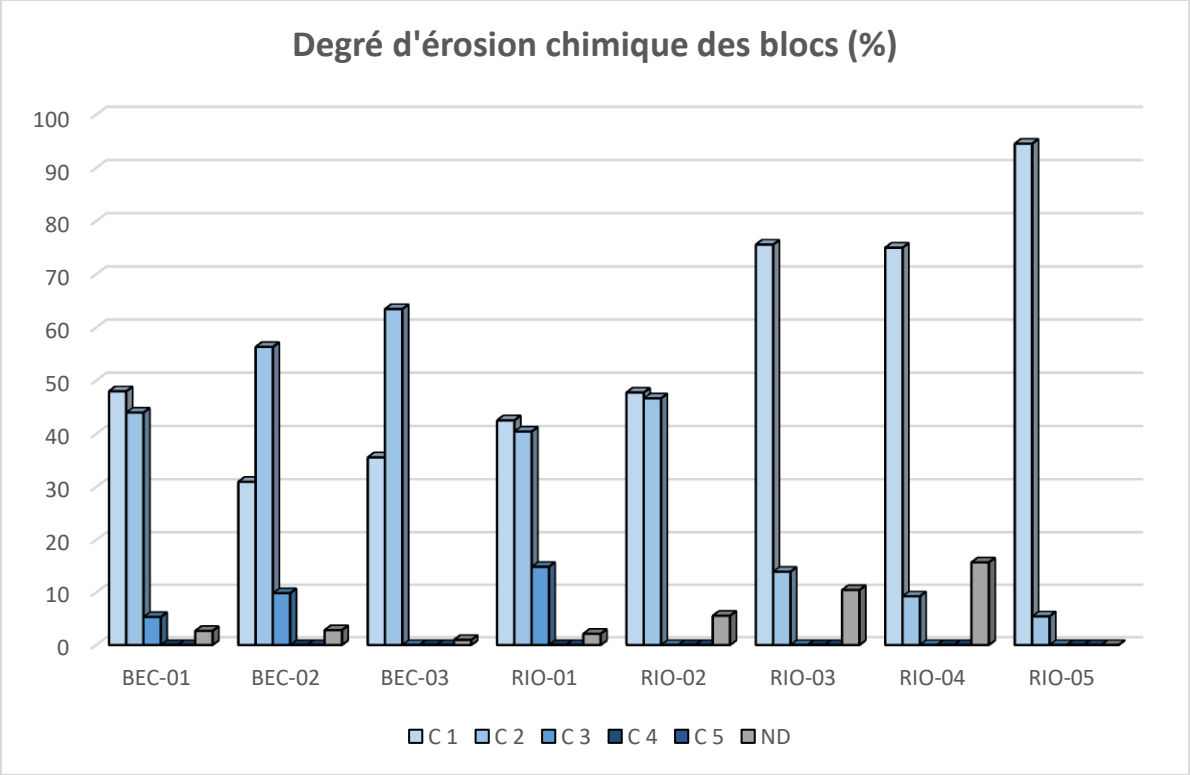


Fig. VI-32. Profils d'érosion chimique des panneaux à damiers étudiés.

Pour les profils d'érosion mécanique (Fig. VI-33), on retrouve la même similitude et la même tendance à la progression de la détérioration sur les panneaux situés à Becán. La plupart des blocs de ces panneaux sont classés en M2, le reste des blocs se partageant notamment les modalités M1 et M3, avec une minorité de M4 et M5. Si RIO-01 se distingue ici aussi par une détérioration mécanique plus avancée, les autres panneaux du site éponyme présentent des profils d'érosion mécanique encore plus avancés, avec les plus hauts pourcentages de M3, M4 et M5 observés sur l'ensemble des

panneaux, en dehors de RIO-05 qui est encore une fois le panneau le moins marqué par les signatures relevées, avec près de 80% de ses blocs classés en M1, et 20% en M2.

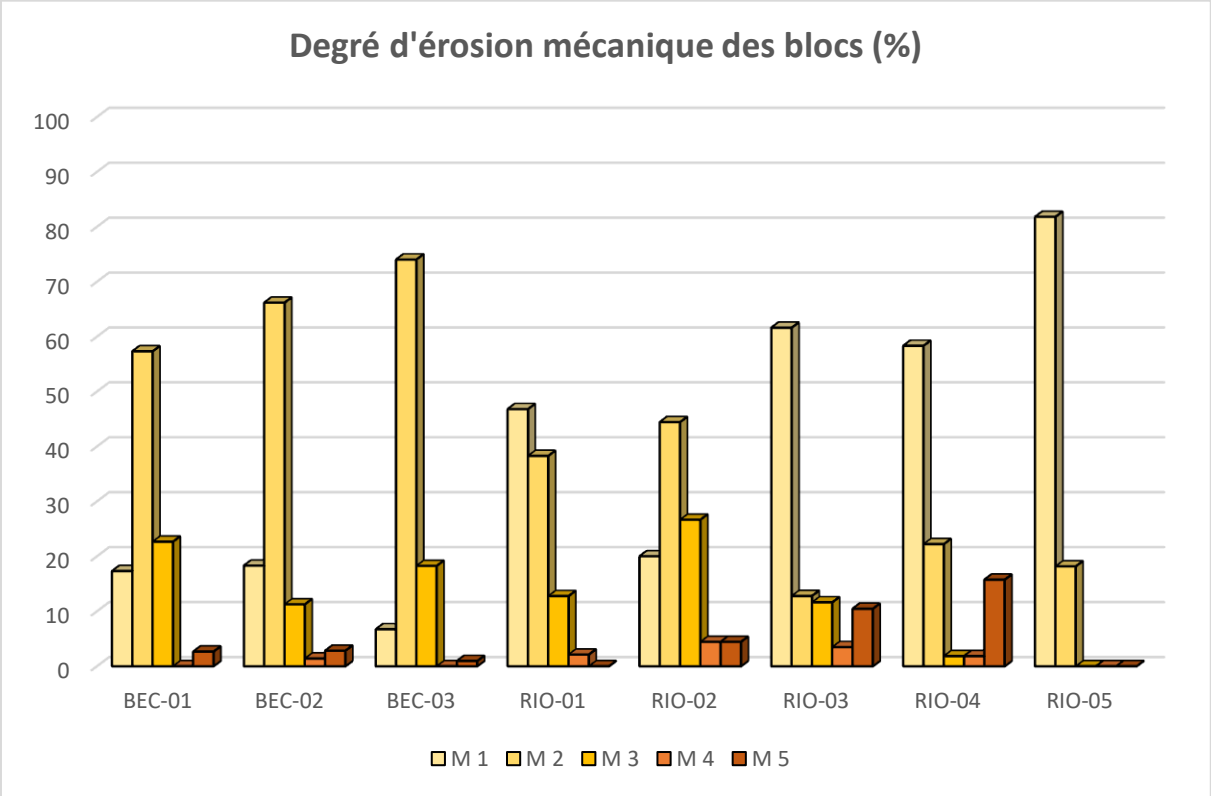


Fig. VI-33. Profils d'érosion mécanique des panneaux à damiers étudiés.

Au total, le calcul des pourcentages des degrés d'érosion chimique et mécanique nous permet, après avoir comparé leur distribution spatiale, de comparer les profils de détérioration des panneaux à damiers. On remarque ainsi la forte similitude de l'ensemble des profils en termes de modalité dominante – généralement les deux premiers degrés relevés – qui est observée sur les deux variables étudiées.

L'analyse en composantes principales (Fig. VI-34) nous a ensuite permis d'aller plus loin dans la comparaison des profils et d'identifier formellement les potentielles ressemblances et dissemblances entre les panneaux à damiers étudiés, en intégrant également les variables relatives à la colonisation biologique qui ont également été relevées *in situ*. Les panneaux BEC-01, RIO-02 et RIO-03 ont été regroupés statistiquement d'une part (en vert), les panneaux BEC-03, BEC-02 et RIO-04 d'autre part (en bleu). RIO-01 et RIO-05 se distinguent quant à eux par une forte corrélation

avec la présence de biofilms noirs pour RIO-05, et avec la présence d'algues roses et de lichens pour RIO-01.

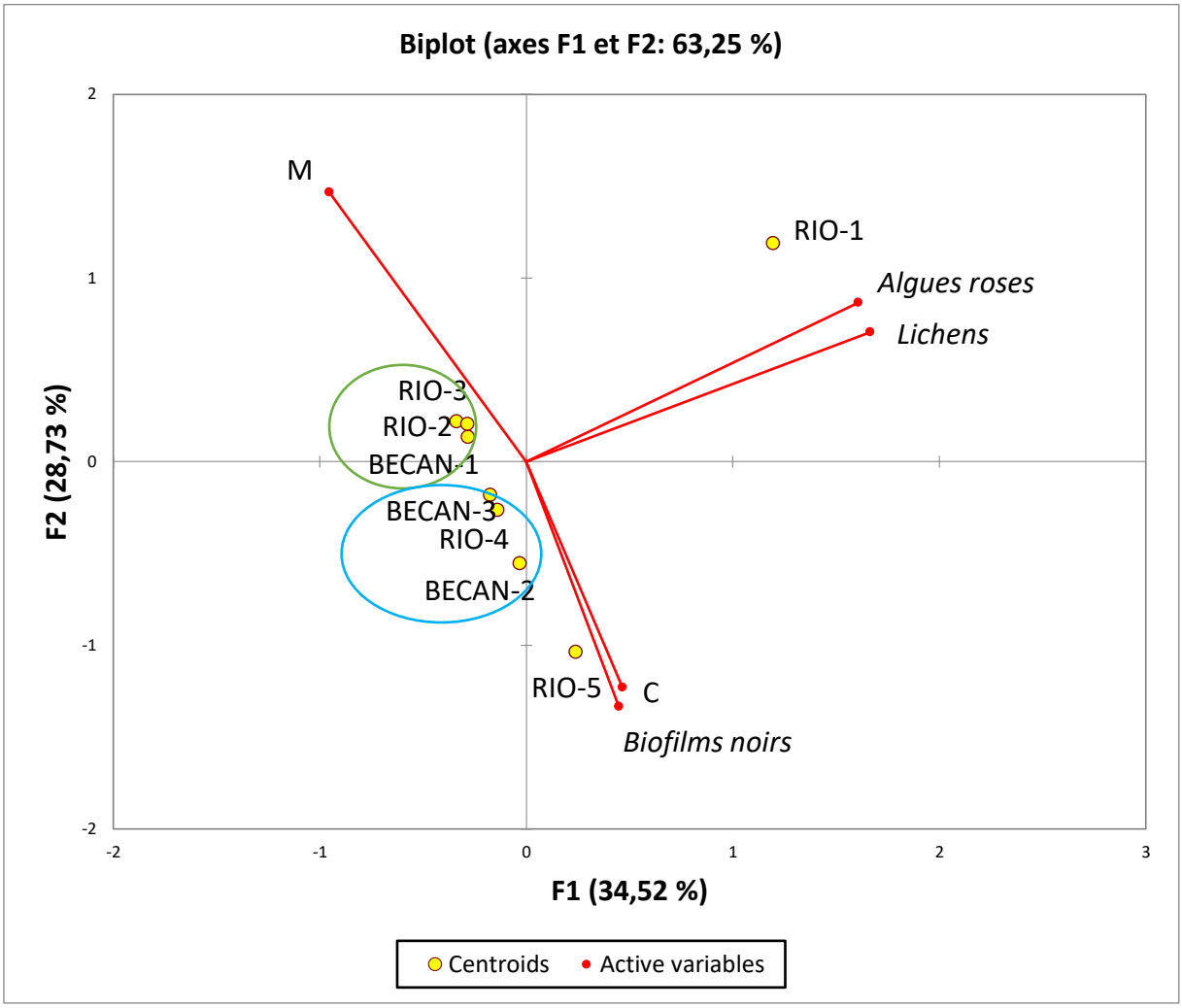


Fig. VI-34. Analyse en composantes principales des variables étudiées sur les panneaux à damiers du secteur Río Bec.

Si la dissemblance de ces deux derniers se retrouve dans les profils d'érosion chimique et mécanique en raison de leur forte différence avec les autres panneaux – détérioration avancée pour RIO-01, peu avancée pour RIO-05 – le regroupement des autres individus est plus difficile à distinguer. En effet, si on retrouve une similitude des profils d'érosion mécanique pour le groupe entouré en vert, les profils d'érosion chimique restent quant à eux assez contrastés. Pour le groupe entouré en bleu, la similitude des profils d'érosion mécanique est plus discutable, et les profils d'érosion chimique sont également très différents. Leur regroupement statistique est probablement dû à l'effet des variables relatives à la colonisation biologique, laquelle est certainement similaire sur les panneaux ainsi regroupés.

Conclusion du chapitre VI

Le diagnostic de la dynamique érosive vise à étudier les modalités de détérioration et l'activité des processus afin de caractériser les régimes d'érosion à l'œuvre sur les structures étudiées via la catégorisation des formes et des intensités de météorisation observées *in situ*. Cette étape de travail se caractérise tout d'abord par une volonté d'étudier les variables choisies à différentes échelles, et ensuite par un accent mis sur la spatialisation des résultats et leur analyse par des méthodes statistiques.

L'analyse de l'état de conservation de l'ensemble des parements du secteur nous a dans un premier temps permis de distinguer le site éponyme de Río Bec, dans lequel prédominent les formes de délitage et où l'intensité de la détérioration est plus avancée. Sur le site de Becán, les résultats montrent une représentativité accrue de l'ensemble du secteur en termes d'intensité de détérioration et de signatures érosives présentes. Le site de Xpuhil, quant à lui, se caractérise par une sous-représentation des signatures associées aux processus de dissolution au profit de celles associées à la desquamation et au creusement. A travers la compilation des données obtenues sur les parements du secteur, nous avons cherché à disposer d'éléments d'interprétation permettant d'identifier de possibles relais de processus et des corrélations entre ces derniers et les résultats de l'anamnèse des structures. Nous avons également souligné la présence non-négligeable des recouvrements biologiques sur les structures des sites archéologiques du secteur Río Bec, dont l'impact sur la spatialisation des régimes d'érosion est susceptible d'être un élément clé de notre travail.

A travers l'étude des corps des tours de la structure 5N2 de Río Bec, nous avons distingué, en termes d'état de conservation, les portions constituant les angles de l'édifice des portions intérieures à ce dernier, ainsi que les différents éléments architecturaux, moulures et corniches présentant une détérioration plus avancée. Par ailleurs, notre intérêt pour le mur de la structure V-A de Becán a produit des résultats permettant de discuter de l'impact d'une reconstruction anthropique qui va, au cours de la période ultérieure d'exposition de l'épiderme rocheux aux agents atmosphériques et biologiques, commander des régimes d'érosion distincts à quelques mètres d'intervalles. Enfin, l'étude des panneaux à damiers a permis de disposer d'éléments de discussion quant aux possibles concomitances et interdépendances des processus associés à la détérioration chimique et à la détérioration mécanique.

Mais les résultats de cette étape de diagnostic de la dynamique érosive doivent, afin de livrer des éléments d'interprétation solides, être considérés en intégrant les résultats des étapes préliminaires d'anamnèse des structures et de caractérisation des facteurs de contrôle. La dernière étape de notre travail, la quantification de l'érosion subactuelle, va à présent nous permettre d'appuyer les conclusions que nous pourrons tirer de l'ensemble de ces étapes en nous fournissant des données chiffrées correspondant à des taux de retrait, des volumes érodés, susceptibles de reconstituer, en lien avec le contrôle chronologique précédemment acquis, le tempo de l'érosion dans les sites archéologiques mayas du secteur Río Bec.

Chapitre VII

Quantification de l'érosion

> *« Ce qui préoccupe l'agronome, ou le technicien de la conservation, confrontés à des problèmes pratiques et immédiats, c'est le jeu,* hic *et* nunc*, d'une dynamique accélérée qu'il leur importe de maîtriser ; mais le géographe ne peut ignorer le passé. L'érosion est en effet une dynamique dont les effets sont cumulatifs, qu'il faut donc, de ce fait, mettre en perspective. »*
>
> René NEBOIT, *L'homme et l'érosion,* 1991.

La volonté de quantification de l'érosion s'inscrit dans une approche géomorphologique de la détérioration des matériaux de construction et permet de disposer de données quantitatives pour étayer les résultats obtenus par le diagnostic de la dynamique érosive. Cette dernière étape de travail est fondée sur la modélisation par photogrammétrie, laquelle permet l'obtention rapide de données fiables, tout en s'affranchissant en grande partie des contraintes logistiques inhérentes aux méthodes impliquant la lasergrammétrie (Vautier et Voldoire, 2011). Dans ce chapitre, nous parlerons de l'ouverture de « fenêtres photogrammétriques » lorsque, par le procédé expliqué dans le chapitre III (voir pp. 118 à 124), une quantification de l'érosion a été effectuée sur une section de parement choisie et délimitée par l'opérateur. Ces fenêtres de quantification ont été ciblées sur des portions du bâti soit particulièrement érodées, soit représentatives de la chronologie des interventions humaines ou des différentes variables explicatives, relatives au contexte local (présence de recouvrement biologique, variations de la morphologie de la structure, différentes orientations du parement, etc…).

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux fenêtres de quantification ciblées qui ont été ouvertes à Becán et Xpuhil, puis, dans un second temps, à celles ouvertes sur les différents corps de la tour nord-est de Río Bec, en vue d'une corrélation avec les résultats précédents concernant leur dégagement progressif. Enfin, nous

présenterons une quantification globale du mur de la structure V-A de Becán, venant en appui au diagnostic de la dynamique érosive sur ce parement.

1. Fenêtres de quantification ciblées

Des fenêtres de quantification de l'érosion ont été ouvertes sur les sites de Becán et Xpuhil et les résultats ont été croisés avec les données recueillies lors de l'anamnèse des structures, afin de pouvoir calculer des taux de retraits annuels moyens en fonction de leur date de dégagement.

1.1. Becán

A Becán, huit fenêtres de quantification ont été ouvertes sur les structures de la place centrale du groupe est (Fig. VII-1), et ont été ciblées sur des portions de structures ayant subi une accélération de l'érosion et présentant un mauvais état de conservation. Les quantifications proposées ici concernent donc les taux de retrait maximum observés sur cette partie du site.

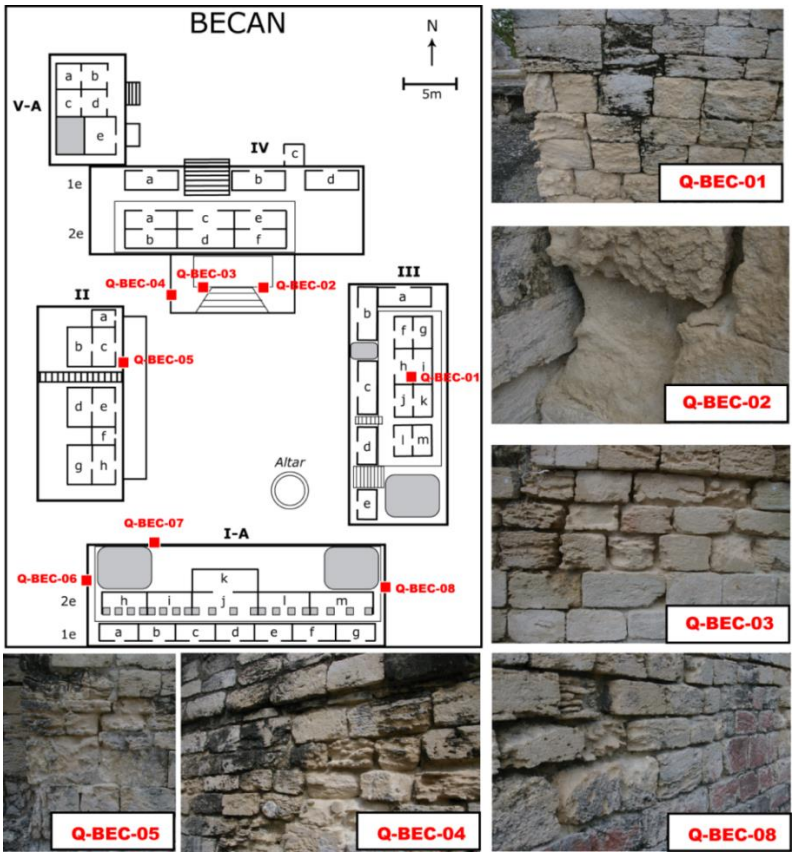
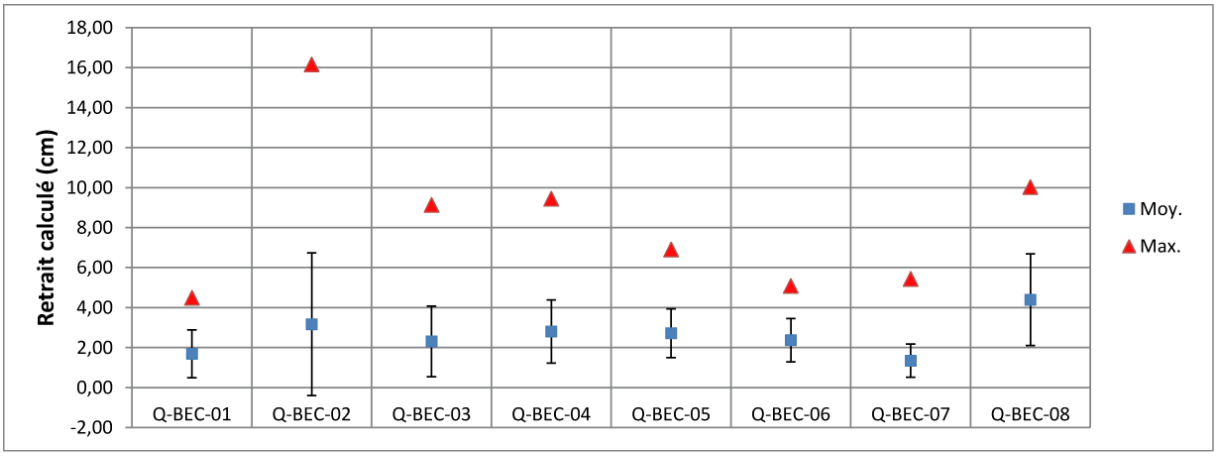


Fig. VII-1. Localisation et clichés des fenêtres de quantification ouvertes sur le site de Becán.

Le traitement des modèles photogrammétriques construits à partir des fenêtres localisées ci-dessus a permis, après soustraction des nuages de points aux surfaces de référence extrapolées, l'obtention des calculs présentés sur la figure VII-2. Ces derniers correspondent à des fenêtres hétérogènes, et doivent être appréciés en fonction du nombre de points du modèle, et de sa résolution en cm², indiqués en dessous des résultats de retrait moyen (les barres d'erreur inférieures et supérieures correspondant à l'écart-type) et maximum calculé sur la fenêtre en question.



	Q-BEC-01	Q-BEC-02	Q-BEC-03	Q-BEC-04	Q-BEC-05	Q-BEC-06	Q-BEC-07	Q-BEC-08
Nb. Points	2128	71606	101500	41293	11621	12375	3319	9432
Résolution (cm²)	0,87	0,19	0,22	0,37	0,35	0,25	0,3	0,28

Fig. VII-2. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur le site de Becán.

Le tableau VII-1 synthétise les quantifications obtenues sur les fenêtres photogrammétriques ouvertes sur le site de Becán, avec le retrait moyen et maximal calculé pour chaque fenêtre, ainsi que les taux de retrait annuels moyens et maximums, quantifiés depuis le dégagement initial des structures. Les taux de retrait maximums les plus élevés s'observent sur les fenêtres Q-BEC-02 (16,16 cm de retrait maximum, soit 0,521 cm par an) et Q-BEC-08 (10,02 cm de retrait maximum, soit 0,477 cm par an). On observe également des taux de retrait maximum relativement importants sur les fenêtres Q-BEC-04 (9,44 cm de retrait maximum, soit 0,305 cm par an) et Q-BEC-03 (9,13 cm de retrait maximum soit 0,295 cm par an). Par ailleurs, la fenêtre Q-BEC-07 montre une érosion rapide de 0,259 cm par an, malgré un taux de retrait maximum de seulement 5,43 cm.

					Retrait observé (cm)		Retrait annuel (cm/année)	
Fenêtre	Structure	Exposition	Dégagement	Consolidation	Max	Moyen (écart-type)	Max	Moyen
Q-BEC-01	III	Ouest	1982	1992	4,48	1,68 (1,19)	0,15	0,05
Q-BEC-02	IV	Sud	1982	1982	16,16	3,16 (3,56)	0,52	0,10
Q-BEC-03	IV	Sud	1982	1982	9,13	2,31 (1,76)	0,30	0,07
Q-BEC-04	IV	Ouest	1982	1982	9,44	2,80 (1,58)	0,31	0,09
Q-BEC-05	II	Est	1982	1992	6,86	2,71 (1,21)	0,22	0,09
Q-BEC-06	I-A	Ouest	1992	1992	5,08	2,37 (1,08)	0,24	0,11
Q-BEC-07	I-A	Nord	1992	1992	5,43	1,34 (0,83)	0,26	0,06
Q-BEC-08	I-A	Est	1992	1992	10,02	4,39 (2,28)	0,48	0,21

Taux de retrait annuel en cm (amplitudes égales)

Maximum :	inférieur à 0,19	de 0,19 à 0,28	de 0,28 à 0,38	supérieur à 0,38
Moyen	inférieur à 0,08	de 0,08 à 0,12	de 0,12 à 0,15	supérieur à 0,15

Tab. VII-1. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur le site de Becán.

Les valeurs les plus élevées se retrouvent à la fois sur des structures dégagées et consolidées en 1982 et sur des structures dégagées et consolidées en 1992. En revanche, les fenêtres correspondant à des structures dégagées en 1982 et ayant fait l'objet d'interventions en 1992 (Q-BEC-01, et Q-BEC-05) présentent les taux de retrait annuels maximum les moins importants, avec respectivement 0,145 cm et 0,221 cm par an depuis leur dégagement initial. En termes d'exposition, les fenêtres orientées au sud et à l'est sont celles où sont observés les taux de retrait maximums les plus élevés (Q-BEC-02, Q-BEC-03, et Q-BEC-08), même si le taux moindre observé sur Q-BEC-05 vient nuancer ce constat. A l'inverse, la fenêtre exposée au nord (Q-BEC-07) présente un taux moyen, et les trois fenêtres exposées à l'ouest présentent les taux les moins élevés.

1.2. Xpuhil

Sur le site archéologique de Xpuhil, ce sont 18 fenêtres de quantification qui ont été ouvertes. Ces dernières ne correspondent plus seulement à des portions de bâti ayant subi une accélération de l'érosion, mais également à des problématiques distinctes existant sur ces portions, telles que l'introduction de ciment lors des consolidations, le recouvrement par des micro-organismes ou un effet d'abri par une demi-voûte reconstruite (Fig. VII-3).

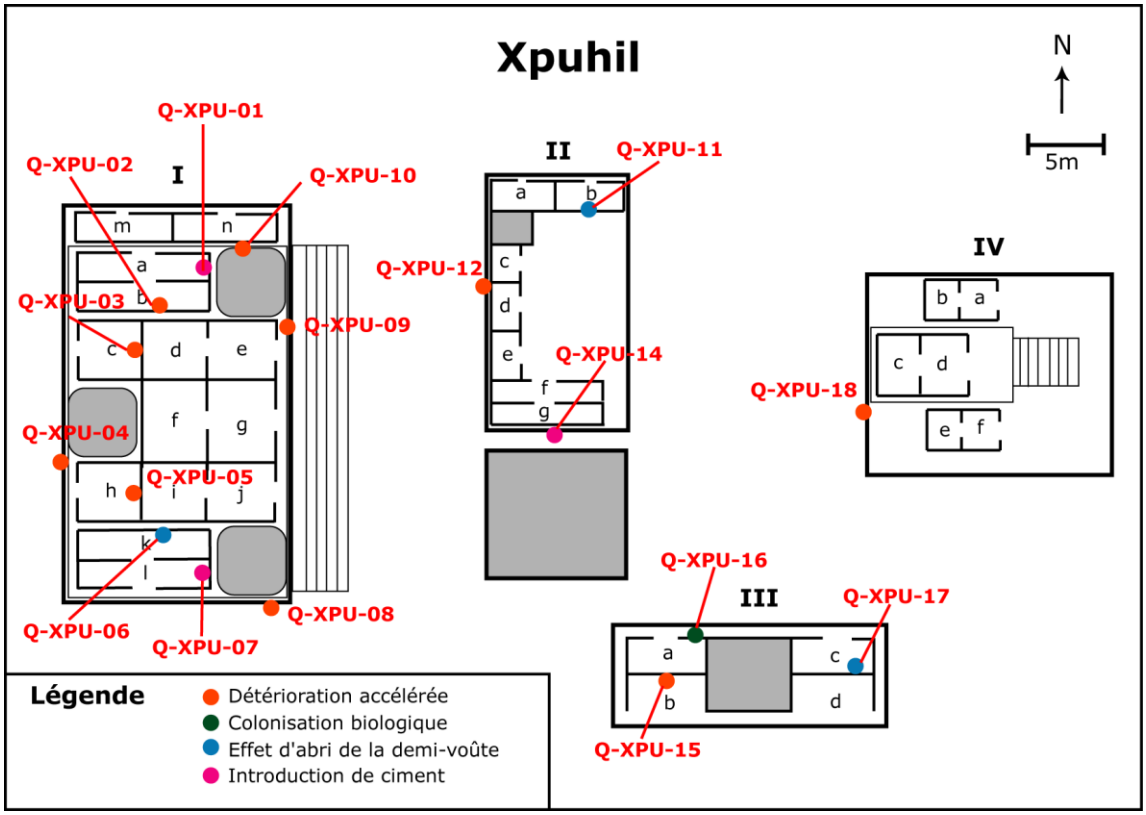
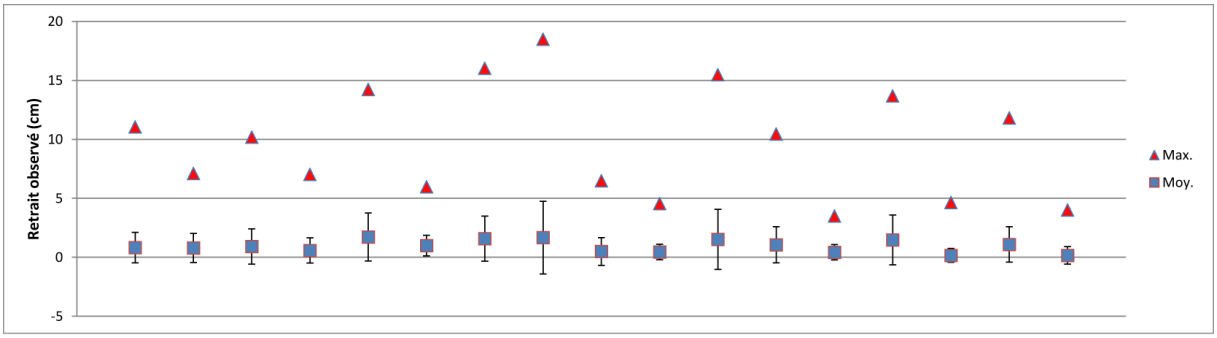


Fig. VII-3. Localisation des fenêtres de quantification ouvertes sur le site archéologique de Xpuhil.

Comme pour le site de Becán, les valeurs de retrait calculées par photogrammétrie et les données relatives à la résolution des modèles sont synthétisées sur la figure VII-4. On distingue nettement les fenêtres Q-XPU-05, Q-XPU-07, Q-XPU-08, Q-XPU-11 et Q-XPU-15, qui s'individualisent par de fortes valeurs maximales et moyennes, ainsi que par un écart-type important.



	Q-XPU-01	Q-XPU-02	Q-XPU-03	Q-XPU-04	Q-XPU-05	Q-XPU-06	Q-XPU-07	Q-XPU-08	Q-XPU-09
Nb. Points	68052	29432	28080	11966	11336	33425	24786	8316	15336
Résolution (cm²)	1,16	1,31	0,94	0,76	1,48	1,54	1,21	0,79	0,63
	Q-XPU-10	Q-XPU-11	Q-XPU-12	Q-XPU-14	Q-XPU-15	Q-XPU-16	Q-XPU-17	Q-XPU-18	
Nb. Points	14960	17113	36956	29640	59346	35343	28223	21593	
Résolution (cm²)	0,78	1,03	0,72	0,55	0,62	0,6	0,93	0,84	

Fig. VII-4. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur le site de Xpuhil.

Les retraits calculés ont ensuite été croisés avec les dates de dégagement et de consolidation des édifices, obtenues par l'anamnèse des structures, et les taux de retrait annuels maximums et moyens ont été calculés (Tab. VII-2).

						Retrait observé (cm)		Retrait annuel (cm/an)	
	Structure	Exposition	Dégagement	Consolidation	Problématique	Max	Moyen (écart-type)	Max	Moyen
Q-XPU-01	I	Ouest	1992	1992	Ciment	11,06	0,82 (1,3)	0,53	0,04
Q-XPU-02	I	Nord	1992	1992	Détérioration	7,1	0,79 (1,23)	0,34	0,04
Q-XPU-03	I	Ouest	1992	1992	Détérioration	10,18	0,91 (1,49)	0,48	0,04
Q-XPU-04	I	Ouest	1982	1982	Détérioration	7,03	0,58 (1,07)	0,23	0,02
Q-XPU-05	I	Ouest	1992	1992	Détérioration	14,23	1,72 (2,03)	0,68	0,08
Q-XPU-06	I	Sud	1982	1982	Abri	5,98	0,99 (0,87)	0,19	0,03
Q-XPU-07	I	Ouest	1982	1982	Ciment	16,02	1,58 (1,91)	0,52	0,05
Q-XPU-08	I	Sud	1982	1982	Détérioration	18,48	1,67 (3,08)	0,60	0,05
Q-XPU-09	I	Est	1982	1982	Détérioration	6,48	0,49 (1,18)	0,21	0,02
Q-XPU-10	I	Nord	1982	1982	Détérioration	4,55	0,45 (0,66)	0,15	0,01
Q-XPU-11	II	Nord	1992	1992	Abri	15,48	1,52 (2,55)	0,74	0,07
Q-XPU-12	II	Ouest	1995	1995	Détérioration	10,45	1,06 (1,54)	0,58	0,06
Q-XPU-14	II	Sud	1995	1995	Ciment	3,5	0,42 (0,65)	0,19	0,02
Q-XPU-15	III	Sud	1992	1992	Détérioration	13,68	1,47 (2,11)	0,65	0,07
Q-XPU-16	III	Nord	1992	1992	Bio	4,65	0,16 (0,59)	0,22	0,01
Q-XPU-17	III	Nord	1992	1992	Abri	11,81	1,09 (1,5)	0,56	0,05
Q-XPU-18	IV	Ouest	1992	1992	Détérioration	4,01	0,16 (0,74)	0,19	0,01

Taux de retrait annuel en cm (amplitudes égales)

Maximum :	inférieur à 0,20	de 0,20 à 0,29	de 0,29 à 0,38	supérieur à 0,38
Moyen :	inférieur à 0,04	de 0,04 à 0,06	de 0,06 à 0,07	supérieur à 0,07

Tab. VII-2. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur le site de Xpuhil.

Si les fenêtres Q-XPU-05, 11 et 15 se distinguent également sur les retraits annuels moyens, les fenêtres Q-XPU-01, 03, 07, 08, 12 et 17 présentent des retraits annuels maximums supérieurs à 0,5 cm par an. Sur les trois fenêtres correspondant à l'introduction de ciment lors de la consolidation, deux sont concernées par ces retraits annuels maximums importants. C'est également le cas pour deux des trois fenêtres correspondant à une configuration de voûte induisant un effet d'abri sur le parement sous-jacent. Enfin, que les fenêtres examinées concernent des structures dégagées en 1982, 1992 ou 1995, les taux de retraits maximums annuels observés peuvent être faibles (inférieurs à 0,20 cm/an) ou très élevés (supérieurs à 0,38 cm/an), et les différentes expositions ne semblent également pas influencer ces valeurs.

2. La tour nord-est de Río Bec

La tour nord-est de Río Bec est située sur la façade nord de la structure 5N2 et, comme sa jumelle du nord-ouest, comporte six corps entourés par des moulures basales et des corniches sommitales. Le dégagement des différentes portions de cette tour, décrit dans la figure VI-10 (p. 217), a été réalisé progressivement et ces corps constituent de

bons points de repère pour croiser des dates de dégagement avec des valeurs de retrait calculées par l'ouverture de fenêtres photogrammétriques. Douze de ces dernières ont été ouvertes sur les différents corps de cette tour (Fig. VII-5).

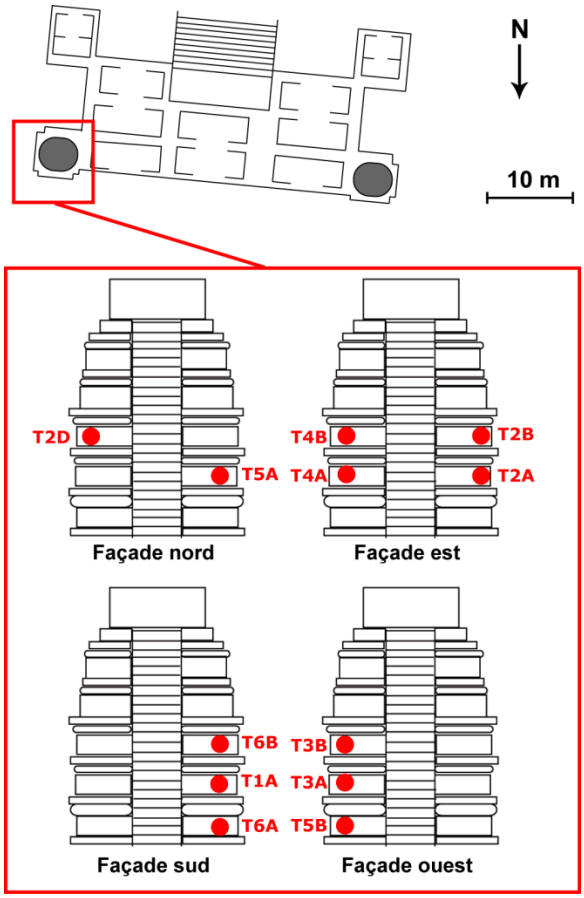
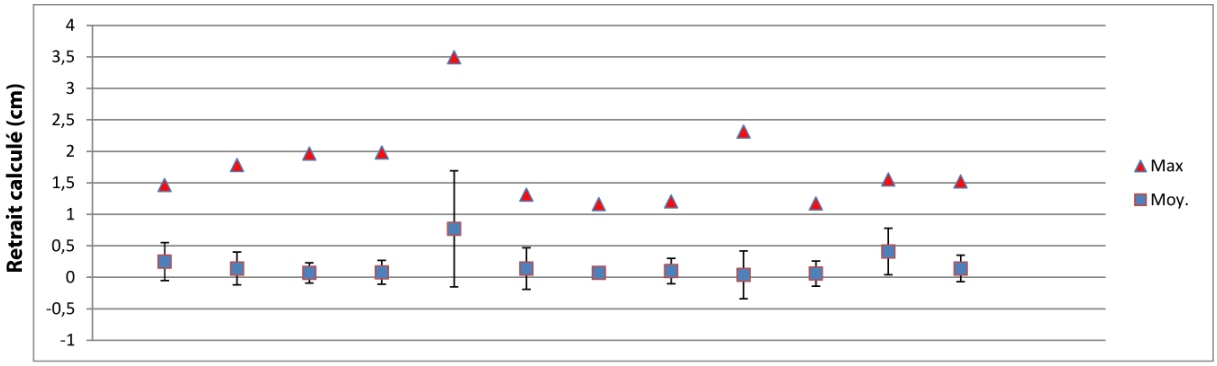


Fig. VII-5. Localisation des fenêtres photogrammétriques sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec.

Pour des raisons d'accessibilité et de sécurité, aucune fenêtre de quantification n'a pu être ouverte au-delà du troisième corps, mais les données recueillies permettent néanmoins la comparaison des retraits observés en fonction des différentes phases de dégagement. Comme pour les fenêtres photogrammétriques de Becán et Xpuhil, il convient dans un premier temps de synthétiser les retraits calculés et la résolution des fenêtres auxquelles ils se rapportent (Fig. VII-6). La fenêtre T3A est la seule à s'individualiser par une valeur maximale extrêmement élevée ainsi qu'un écart-type très important. Les autres fenêtres présentent des retraits généralement peu élevés – inférieurs à 2 cm – en dehors de T5A. Les écarts-types des retraits calculés sont globalement faibles, en dehors de T1A, T3B, T5A, et T6A. Aucune corrélation notable n'est à noter entre ces valeurs de retrait et les données concernant la résolution des modèles obtenus.



	T1A	T2A	T2B	T2D	T3A	T3B
Nb. Points	12566	60989	80534	75383	66740	55066
Résolution (cm²)	0,32	0,12	0,1	0,12	0,13	0,14
	T4A	T4B	T5A	T5B	T6A	T6B
Nb. Points	6536	32200	65444	19668	16000	38391
Résolution (cm²)	0,39	0,19	0,15	0,25	0,27	0,16

Fig. VII-6. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec.

Les taux de retrait annuel ont été calculés en fonction des informations collectées lors de l'anamnèse des structures (Tab. VII-3). Les fenêtres localisées sur le troisième corps de la tour n'ont pas de date d'intervention connue et sont donc susceptibles d'être restées exposées bien plus longtemps que celles des deuxième et troisième corps.

				Retrait observé (cm)		Retrait annuel (cm/an)	
	Corps	Exposition	Dégagement	Max	Moyen (écart-type)	Max	Moyen
T1A	2ème	Sud	2008-09	1,46	0,25 (0,30)	0,29	0,05
T2A	2ème	Est	2008-09	1,78	0,14 (0,26)	0,36	0,03
T2B	3ème	Est	-	1,96	0,07 (0,16)	?	?
T2D	3ème	Nord	-	1,98	0,08 (0,19)	?	?
T3A	2ème	Ouest	2006	3,49	0,77 (0,92)	0,50	0,11
T3B	3ème	Ouest	-	1,31	0,14 (0,33)	?	?
T4A	2ème	Est	2008-09	1,16	0,07 (0,10)	0,23	0,01
T4B	3ème	Est	-	1,20	0,10 (0,20)	?	?
T5A	2ème	Nord	2008-09	2,31	0,04 (0,38)	0,46	0,01
T5B	1er	Ouest	2006	1,17	0,06 (0,20)	0,17	0,01
T6A	1er	Sud	2008-09	1,55	0,41 (0,37)	0,31	0,08
T6B	3ème	Sud	-	1,52	0,14 (0,21)	?	?

Taux de retrait observé en cm (amplitudes égales)

Maximum : inférieur à 1,74 | de 1,74 à 2,32 | de 2,32 à 2,90 | supérieur à 2,90

Taux de retrait annuel en cm (amplitudes égales)

Maximum : inférieur à 0,25 | de 0,25 à 0,33 | de 0,33 à 0,41 | supérieur à 0,41

Moyen : inférieur à 0,025 | de 0,025 à 0,05 | de 0,05 à 0,075 | supérieur à 0,075

Tab. VII-3. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec.

Les fenêtres concernant ce troisième corps ne présentent pas de retrait maximal excessif et restent dans la moyenne des valeurs observées sur les fenêtres des premier et deuxième corps. Pour les portions de la tour dégagées en 2006, T3A se distingue par un retrait maximal extrêmement fort (0,50 cm par an), alors que T5B présente une des valeurs les plus faibles (0,17 cm par an). Pour les portions dégagées entre les saisons 2008 et 2009 du projet Río Bec, les fenêtres T5A et T2A se distinguent par des taux de retrait élevés, respectivement de 0,46 cm par an et de 0,36 cm par an. Enfin, les taux de retrait annuels moyens sur les fenêtres T1A et T6A sont également plus élevés pour ces deux fenêtres exposées au sud. Sur l'ensemble de ces mesures, TA3 s'individualise fortement en raison d'un taux de retrait observé près de deux fois supérieur à celui des autres fenêtres. A cet égard, l'étude en détail du résultat de cette opération de quantification parait judicieux (Fig. VII-7).

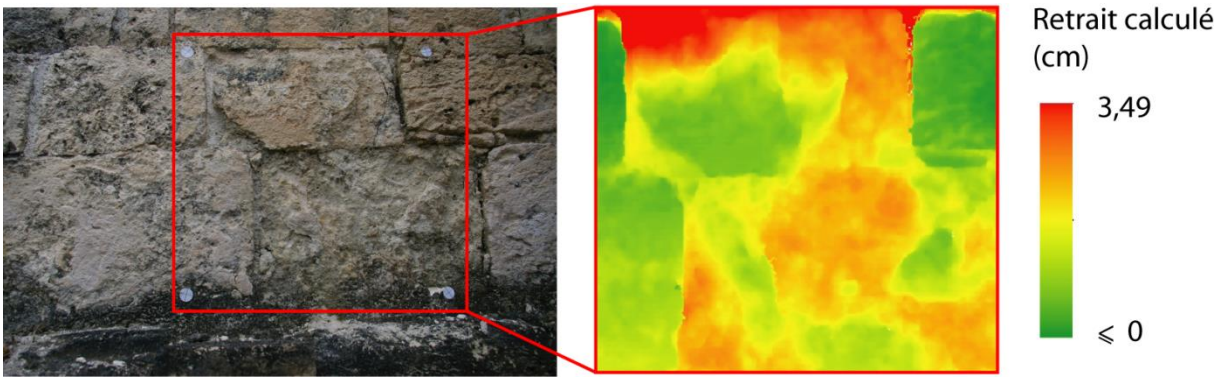


Fig. VII-7. Fenêtre de quantification TA3 : cliché de la surface étudiée (à gauche) et résultat de l'opération de quantification montrant le retrait calculé par photogrammétrie (à droite).

Le cliché de la surface étudiée correspondant à la fenêtre TA3, présenté sur la figure VII-6, montre que les valeurs de retrait les plus importantes se localisent sur la partie supérieure d'un bloc sujet à une désagrégation granulaire accélérée. Cette dernière se rapproche fortement de ce qui a été observé et référencé sous l'appellation « creusement » au cours de ce travail. En outre, on distingue nettement les deux blocs en bon état de conservation des deux côtés du bloc détérioré, venant constituer la surface de référence correspondant à une valeur de retrait inférieure ou égale à zéro.

3. Le mur de la structure V-A de Becán

Situé à l'extrémité méridionale de la structure V-A de Becán et exposé à l'ouest (Fig. VII-8), ce parement a attiré notre attention en raison de la spatialité marquée de l'état de conservation des matériaux qui le constituent.

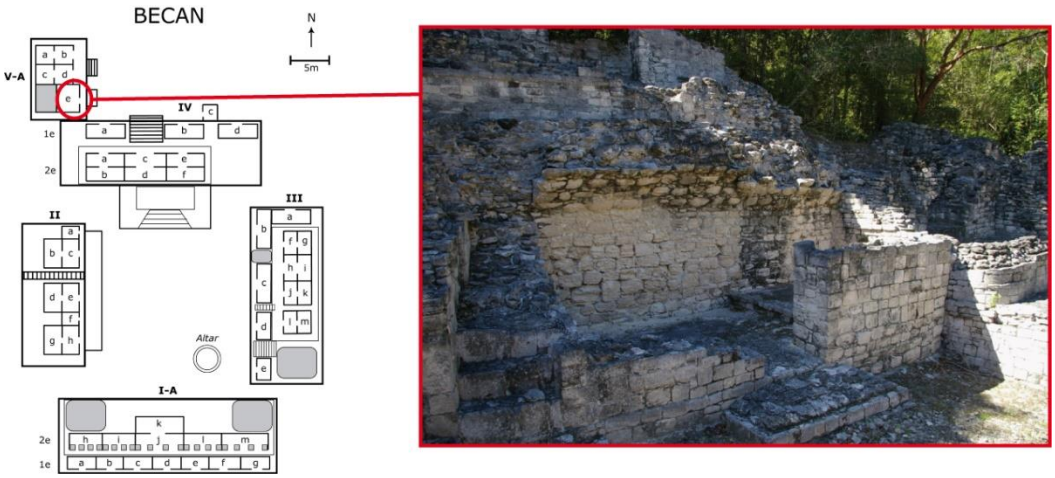


Fig. VII-8. Localisation et vue d'ensemble du mur de la structure V-A de Becán.

En effet, comme cela a été expliqué pour les autres résultats concernant ce parement, plusieurs parties distinctes s'individualisent, tant en termes de signatures érosives présentes qu'en termes de colonisation biologique (Fig. VII-9). La partie A est surmontée d'une demi-voûte bien reconstruite et présente un moins bon état de conservation que les parties B et C, surmontées par une demi-voûte réduite. La partie B est également colonisée par un biofilm noir, moins présent sur la partie C.

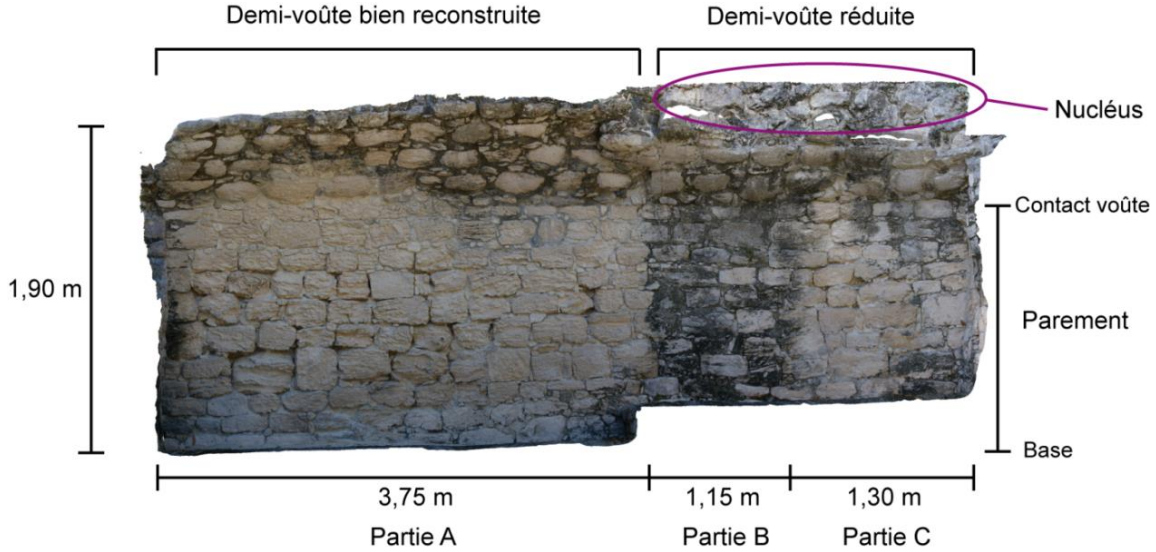
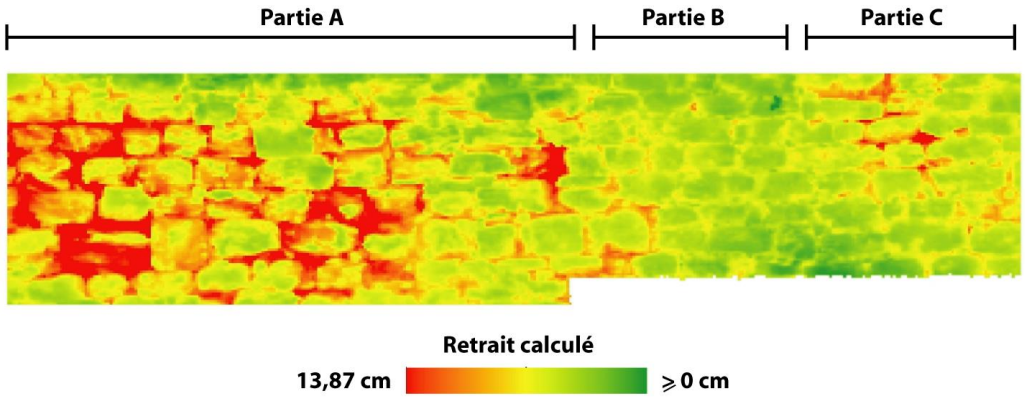


Fig. VII-9. Différentes parties identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán.

Après l'extrapolation d'une surface de référence suivant le profil du mur, le retrait du parement a été calculé sur l'ensemble du parement, puis pour chacune des parties identifiées (Fig. VII-10).



	Retrait calculé (cm)		Données du modèle	
	Max	Moyen (écart-type)	Nb. Points	Résolution
Global	13,87	1,03 (1,81)	32552	2,66
Partie A	13,87	2,00 (1,92)	19040	2,66
Partie B	4,15	0,07 (0,82)	8594	2,66
Partie C	9,57	0,46 (1,09)	4918	2,66

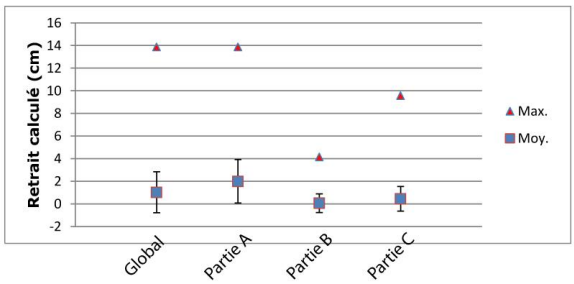


Fig. VII-10. Résultats de la quantification de l'érosion sur les trois parties identifiées du mur de la structure V-A de Becán.

Les résultats montrent clairement un retrait très important sur la partie A, important sur la partie C, et relativement faible sur la partie B. Pour l'ensemble du parement, la valeur de retrait maximale s'élève à 13,87 cm, cette dernière se retrouve sur la partie A alors que la valeur de retrait maximale calculée sur la partie B n'est que de 4,15 cm, et sur la partie de 9,57 cm. La valeur moyenne de retrait quant à elle est très élevée sur la partie A avec 2 cm sur l'ensemble de la section mesurée, alors qu'elle n'est que de 0,07 cm sur la partie B et 0,46 cm sur la partie C. Enfin, les valeurs de retrait sont plutôt homogènes sur les parties B et C alors qu'elles sont très hétérogènes sur la partie A, avec beaucoup de valeurs extrêmes.

Au cours de l'anamnèse des structures, aucune intervention pratiquée sur ce mur n'a été relevée. Quant à son dégagement, il est possible de le dater du dégagement de la structure V-A, auquel il appartient, opéré par Lewis C. Messenger en 1974 (Messenger, 1975). En effet, les rapports concernant les travaux suivants (Bueno et Gutierrez, 1985), menés dans les années 1980 par Ricardo Bueno, comportent des photographies de ce mur

(Fig. VII-11) sur lesquelles s'observe à l'époque la même configuration architectonique avec une demi-voûte plus ou moins bien reconstruite en aplomb des différentes sections du parement.

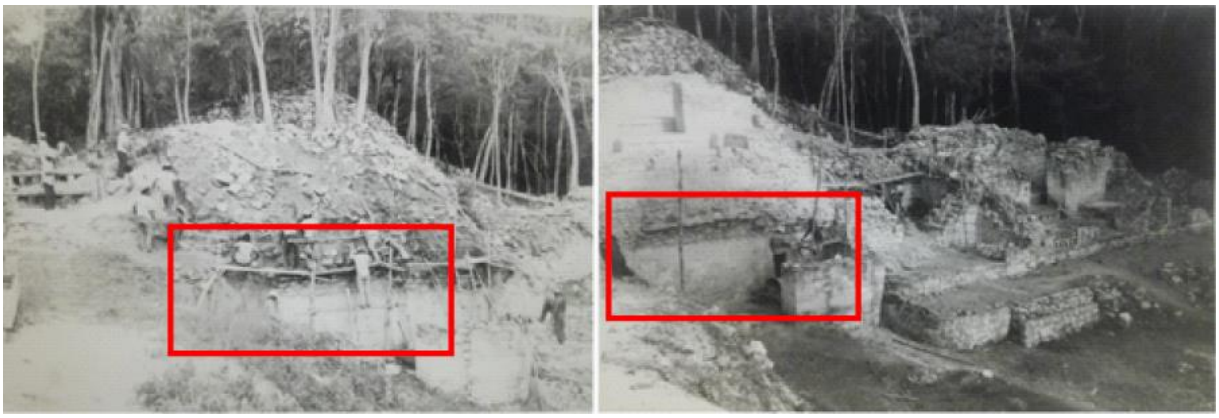


Fig. VII-11. Photographies du mur de la structure V-A de Becán (encadré en rouge) lors des interventions de Bueno en 1985 (Bueno et Gutierrez, 1985).

Afin de calculer des taux de retrait pour ces différentes parties du mur (Tab. VII-4), deux hypothèses ont été retenues : la première est celle d'un dégagement opéré en 1974 par Messenger, en même temps que l'intégralité de la structure ; la seconde est celle d'un dégagement opéré en 1985 par les équipes de Ricardo Bueno, dont la mention dans les rapports d'opérations aurait échappé à l'auteur du présent manuscrit.

Taux de retrait annuel en cm/an

	Hypothèse 1974		Hypothèse 1985	
	Max	Moyen	Max	Moyen
Global	0,356	0,026	0,495	0,037
Partie A	0,356	0,051	0,495	0,071
Partie B	0,106	0,002	0,148	0,003
Partie C	0,245	0,012	0,342	0,016

Tab. VII-4. Taux de retrait annuel calculé en fonction des deux hypothèses de dégagement du parement.

Les taux de retrait annuel maximum calculés sur la partie A, pour les deux hypothèses, sont du même ordre que les taux de retrait maximum les plus élevés calculés sur les fenêtres de quantification ouvertes sur les sites archéologiques de Xpuhil et Becán, ainsi que sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec.

Les résultats de la quantification de l'érosion pratiquée sur ce parement permettent de distinguer clairement une organisation spatiale singulière de son état de conservation. La partie A, surmontée par une demi-voûte bien reconstruite et non colonisée par le biofilm cyanobactérien, est beaucoup plus détériorée que la partie B, au-dessus de laquelle la demi-voûte est moins présente et sur laquelle le biofilm est très développé. La partie C, quant à elle, se situe entre les deux précédentes en termes de conservation. Elle n'est pas recouverte par une demi-voûte bien reconstruite, mais n'est pas non plus colonisée par le biofilm cyanobactérien. L'interprétation de cette spatialisation des régimes d'érosion en fonction de la morphologie du bâti archéologique devra croiser les différents résultats obtenus sur ce parement par les différentes méthodologies adoptées (monitoring climatique, relevés de diagnostic, quantification de l'érosion).

Conclusion du chapitre VII

Les opérations de quantification ont été menées selon différentes problématiques en fonction des sites archéologiques étudiés, et de leurs spécificités. A Becán, ils ont permis de montrer que les taux de retrait observés sur les structures dégagées en 1982 ne sont pas plus importants que ceux observés sur les structures dégagées en 1992. En revanche, les structures dégagées en 1982 et intervenues en 1992 présentent des taux de retrait moins importants. Par ailleurs, les fenêtres de quantification exposées au sud et à l'est présentent un état de détérioration plus avancé que celles exposées à l'ouest.

A Xpuhil, le travail autour de problématiques spécifiques associées aux fenêtres de quantification a permis de souligner l'impact de l'introduction de ciment dans les restaurations avec deux fenêtres sur trois présentant des taux de retrait très avancés, ainsi que celui de la reconstruction des demi-voûtes en surplomb des parements avec ici aussi deux fenêtres sur trois présentant des taux de retrait avancés. Néanmoins, sur ce site, les différentes expositions des parements ainsi que leur date de dégagement ne semblent pas entrer en compte dans l'avancement de leur état de détérioration.

Les résultats obtenus sur les différents corps des tours du site de Rio Bec ont montré encore une fois, et comme cela a été souligné à de nombreuses reprises dans les résultats de cette recherche, que les formes de désagrégation granulaire très accentuées comme celle observée ici sont fortement corrélées non seulement à de moins bons états de conservation, mais aussi à des valeurs de retrait plus importantes. Les formes de creusement représentent donc la signature des processus aux effets les plus délétères, tant au niveau visuel sur les états de conservation évalués par expertise, qu'au niveau quantitatif comme cela l'a été montré par les valeurs de retrait plus importantes observée sur les matériaux calcaires marqués par cette signature. Reste à identifier les facteurs de contrôle qui président à l'entrée en jeu et à l'efficacité de ce processus.

Enfin, les résultats concernant le mur de la structure V-A de Becán ont ici aussi mis en évidence et confirmé la variabilité spatiale de l'avancée de l'érosion entre les différentes parties du parement, identifiées sur des bases morphologiques et architectoniques. En effet, les processus d'érosion semblent être plus efficaces lorsqu'une demi-voûte a été reconstruite en aplomb du parement vertical, tout en étant en lien avec la colonisation de ce dernier par les micro-organismes.

Au total, les opérations de quantification menées sur les différents sites étudiés ne nous ont pas amené à reconsidérer radicalement la vision déjà globale des modalités d'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. En revanche, elles nous ont permis de confirmer des éléments d'interprétation déjà avancés et nous ont fourni des données chiffrées permettant de raisonner à la fois qualitativement et quantitativement. De même, bien qu'un soin particulier ait été apporté à la présentation de la résolution et de la précision des modèles construits et utilisés, il convient de rappeler les limites de cette méthode de quantification par photogrammétrie multi-images. Premièrement, bien que plus facile à mettre en œuvre du point logistique que les méthodes impliquant la lasergrammétrie, elle est confrontée à la même limite quant à la validité de la surface de référence extrapolée à partir de laquelle sont calculées les valeurs de retrait. Deuxièmement, la quantification par photogrammétrie multi-images implique un grand nombre d'étapes entre la collecte des données et l'obtention des valeurs de retrait. Autant d'étapes au cours desquelles peuvent s'accumuler tant les erreurs informatiques et infographiques que les imprécisions humaines.

PARTIE 3

Discussion et conclusions

Chapitre VIII

Interprétation des résultats

« L'espérance ternit l'observation. Il est facile de prendre un raisonnement clair pour un raisonnement correct. »

Frank HERBERT, *Dune,* 1965.

Au terme des quatre étapes de travail dont les résultats ont été présentés dans la partie précédente, nous disposons d'un nombre important d'éléments d'interprétation pour tenter de répondre à notre questionnement central : dans quelle mesure les interventions humaines ont-elles influencé les modalités et les vitesses d'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec ?

En effet, l'anamnèse des structures étudiées a abouti à l'acquisition d'un contrôle chronologique, certes incomplet mais largement utilisable dans le cadre de notre problématique, ainsi qu'à l'identification des interventions humaines et à une classification, certainement améliorable, des monuments qu'il nous a été donné d'étudier. La caractérisation des facteurs de contrôle intrinsèques a permis d'identifier la variabilité des faciès carbonatés présents dans les matériaux de construction ainsi que leurs principales caractéristiques de durabilité. L'étude des paramètres climatiques a permis de souligner la saisonnalité de ces derniers, ainsi que leur variabilité en fonction de l'exposition des structures, mais aussi des ambiances forestières et dégagées. Grâce au diagnostic de la dynamique érosive, nous disposons d'un grand nombre de données permettant de comparer, en fonction des signatures érosives des différents processus et de l'intensité de la détérioration, des portions de bâti dont l'anamnèse a montré les différences d'évolution en termes d'interventions humaines. Cette étape a également permis de mettre en évidence des corrélations entre intensités de détérioration, processus érosifs et colonisation biologique, qui nous offrent la possibilité de dresser un « tableau » des modalités de détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Enfin, la quantification de l'érosion sur des fenêtres ciblées a procuré des données

chiffrées de vitesses d'érosion, en confrontant les retraits observés à la durée d'exposition des structures, déterminée par l'anamnèse.

Afin de présenter les apports du présent travail à travers le croisement des résultats de ces quatre étapes, nous interpréterons ces résultats en trois temps. Nous proposerons tout d'abord une évaluation de la durabilité des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, largement fondée sur la caractérisation des facteurs de contrôle : en quoi les caractéristiques physico-chimiques des matériaux étudiés sont-elles susceptibles d'en faire des matériaux résistants ou fragiles ? Quels processus sont favorisés par les différentes ambiances climatiques identifiées ? Nous tenterons ensuite, sur la base de cette première évaluation, mais aussi du diagnostic de la dynamique érosive et des vitesses d'érosion calculées, d'établir un *modus operandi* de la détérioration des vestiges du secteur Río Bec : comment agissent les processus érosifs ? Existe-t-il des relais entre ces processus, des concomitances, ou des interactions avec les recouvrements biologiques ? Nous essaierons enfin d'attester l'impact des interventions humaines à différentes échelles : en quoi les différentes trajectoires d'intervention influencent-elles les modalités et les vitesses d'érosion sur les structures étudiées ? Les interventions ponctuelles peuvent-elles avoir un impact localisé sur les régimes d'érosion ?

Cette démarche nous conduira donc à partir du jeu des facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques, isolé du contexte archéologique, pour ensuite incorporer ce dernier à notre réflexion et établir un cadre d'analyse – le *modus operandi* – qui sera notre référence pour apporter enfin des éléments de réponse à notre problématique sur le forçage anthropique que constituent les interventions humaines.

1. Évaluation de la durabilité des matériaux de construction étudiés

Au cours de la caractérisation des matériaux de construction, deux principaux faciès ont été identifiés : le faciès « *caliche* », typique des croûtes calcaires, et le faciès laguno-continental dolomitique. Les facteurs de vulnérabilité et la grande variabilité de ces faciès au sein des échantillons analysés ont été soulignés. De plus, la caractérisation des paramètres climatiques a montré leur saisonnalité en termes de température, humidité, et amplitudes hygrothermiques. Trois saisons ont été distinguées : la saison sèche, la saison des pluies, et une saison de transition. En croisant ces deux

caractérisations, il convient de discuter dans un premier temps la durabilité des matériaux de construction en fonction des faciès identifiés et des modalités de leur détérioration. Dans un deuxième temps, nous tenterons de déterminer quels processus érosifs sont les plus susceptibles d'entrer en action, en lien avec la variabilité des paramètres climatiques qui commandent leur efficacité.

1.1. Variabilité des faciès : la durabilité des matériaux entre érosion différentielle et biominéralisation

L'identification des deux faciès à l'issue de la caractérisation des facteurs de contrôle intrinsèques a surtout permis d'insister sur le fait qu'il n'est pas possible d'attribuer l'un ou l'autre faciès aux matériaux étudiés. En effet, ces derniers correspondent plutôt à des variations des deux faciès en fonction de la prévalence des caractéristiques physiques les rapprochant, à différents degrés, soit du faciès laguno-continental dolomitique, soit du faciès *caliche*.

On peut, de prime abord, être tenté d'attribuer une durabilité supérieure aux matériaux qui se rapprochent le plus du faciès laguno-continental dolomitique, en raison de leur degré de diagenèse plus avancé, de la vulnérabilité moindre des cristaux de dolomite par rapport aux cristaux de calcite, et de sa porosité bien inférieure à celle du faciès *caliche*. En effet, un réseau poreux plus développé permet une circulation accrue des fluides au sein de la roche et accentue l'efficacité des processus de dissolution, quand l'eau vient dissoudre les éléments carbonatés à la surface, mais également au sein de la roche. A cet égard, si les cristaux de dolomite sont légèrement plus durs et plus denses que les cristaux de calcite, ils sont surtout moins solubles dans l'eau et ont une réactivité moindre aux acides susceptibles d'être contenus dans les eaux de pluie.

Pourtant, l'évaluation de la durabilité des matériaux de construction étudiés doit tenir compte de la variabilité des caractéristiques des deux faciès au sein des échantillons, et surtout de l'équilibre entre les facteurs de durabilité et les facteurs de vulnérabilité au sein de chacun des faciès. Au sein du faciès *caliche,* ce sont l'érosion différentielle et la néoformation de calcite par biominéralisation qui ont été respectivement identifiées comme principaux facteurs de vulnérabilité et de durabilité.

1.1.1. L'érosion différentielle : le facteur de vulnérabilité principal

Dans les faciès *caliche,* les observations en lames minces de l'interface des matériaux avec l'atmosphère ont permis de distinguer une augmentation de la porosité depuis l'intérieur de la roche vers cet espace d'interface. Cette augmentation est notamment due à la dissolution préférentielle de la matrice micritique dont le faible degré de cristallisation et la texture induisent une vulnérabilité supérieure à celle des oncolithes. Cette vulnérabilité est également indiquée par la porosité supérieure observée à la périphérie de ces agrégats, qui provoque leur chute, par action de la gravité, une fois que la matrice micritique n'assure plus la cohérence de la texture (Fig. VIII-1).

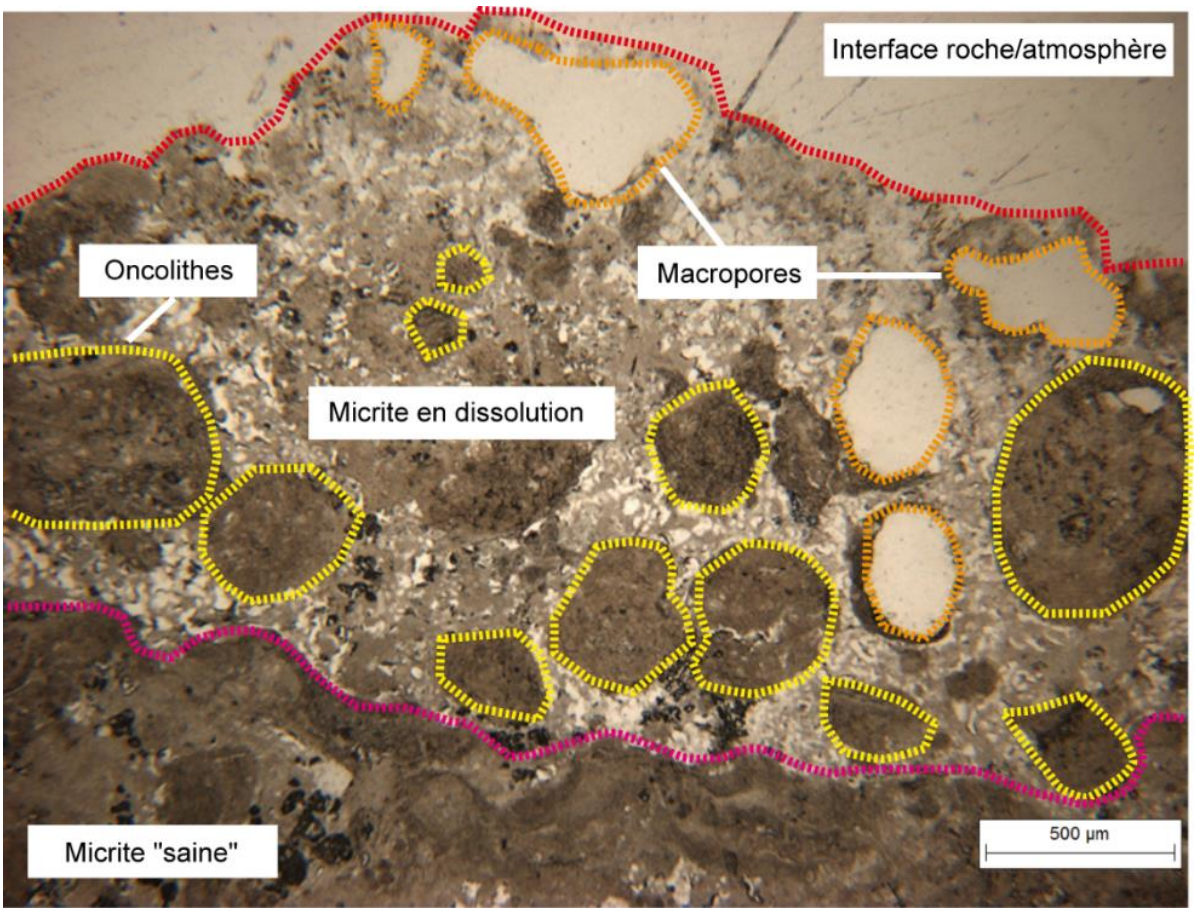


Fig. VIII-1. Interface de XPU-06, montrant les macropores résultant de la chute des oncolithes après la dissolution préférentielle de la matrice micritique, observée en lumière naturelle.

Cette chute des oncolithes à l'interface de la roche avec l'atmosphère s'observe dans l'ensemble des échantillons dont les caractéristiques se rapprochent davantage du faciès *caliche.* Ce phénomène d'érosion différentielle par dissolution constitue un facteur non négligeable de vulnérabilité dans le sens où il induit, suite à l'action d'un processus

commandé par l'eau, typique d'érosion des matériaux carbonatés, une action mécanique commandée par la gravité, entraînant des pertes de matière relativement importantes. Les macropores résultant de la chute des oncolithes laissent ensuite des reliquats de matrice micritique en suspens, directement prêts à être pris en charge par les processus de dissolution, ou par simple désagrégation mécanique. L'interface de la roche avec l'atmosphère est ainsi progressivement détériorée sur une tranche d'épaisseur variable, généralement autour de 1 mm. Au-delà, vers l'intérieur de la roche, on trouve une micrite « saine », moins poreuse et d'apparence plus cohérente. L'érosion préférentielle progresse donc depuis l'interface avec l'atmosphère vers l'intérieur de la roche en faisant progressivement chuter les oncolithes insérés dans la matrice micritique en dissolution, qui s'étend progressivement vers la micrite « saine » (Fig. VIII-2).

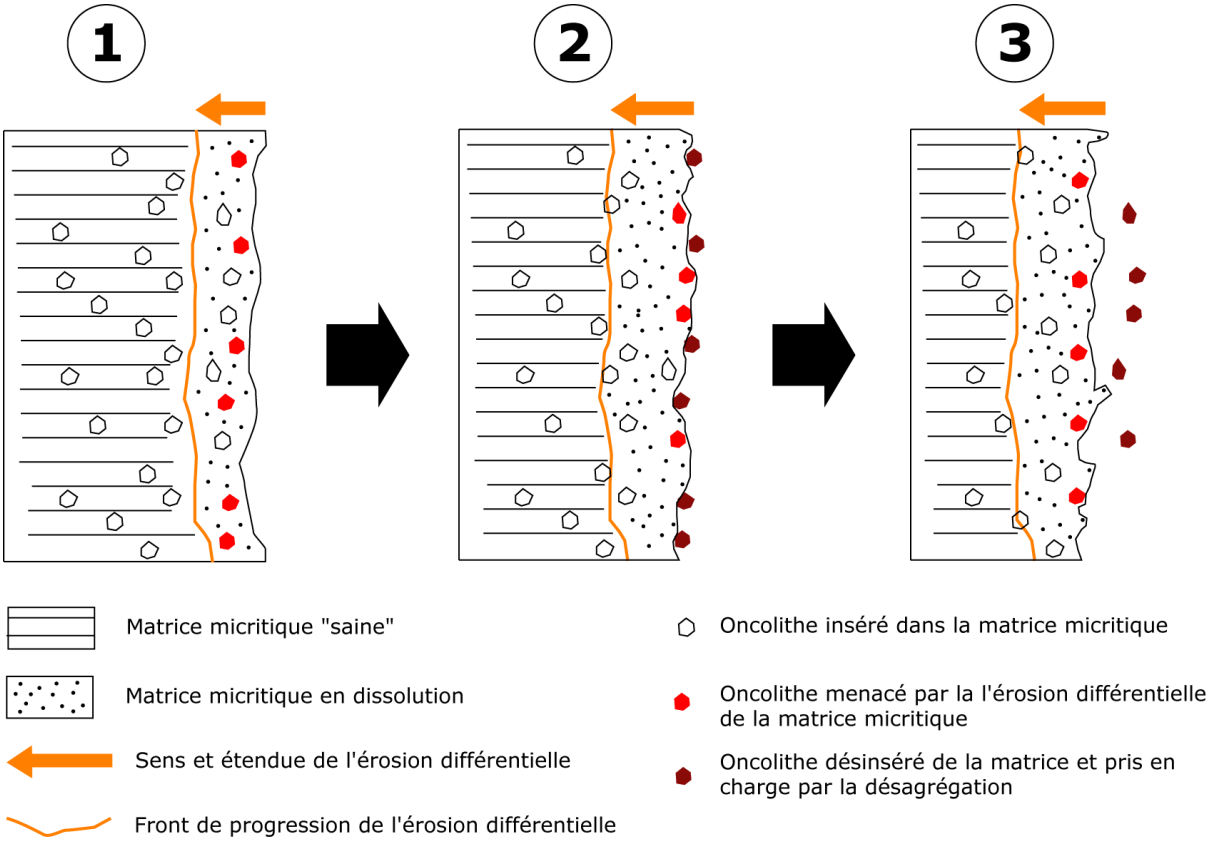


Fig. VIII-2. Schéma de la détérioration des matériaux de construction étudiés selon la progression de l'érosion préférentielle.

Ce relai de processus, dans lequel une désagrégation mécanique des oncolithes est favorisée par une dissolution chimique préalable, est largement moins présent dans le faciès laguno-continental dolomitique où le degré de diagenèse plus avancé induit une insertion des oncolithes, toujours présents, dans un matrice plus finement cristallisée et structurée par des trames de dolosparite et des niveaux microsparitiques procurant une

plus grande cohésion. Dans les matériaux présentant les caractéristiques associées au faciès *caliche,* l'érosion différentielle est susceptible d'être très efficace. Elle implique en effet dans un premier temps le processus de dissolution, largement actif sur les calcaires en contexte tropical où il est favorisé par l'humidité constante et les abondantes pluies saisonnières, et dans un deuxième temps la simple action mécanique de la gravité sur les oncolithes fragilisés par la dissolution de la matrice micritique dans laquelle ils sont insérés.

Au final, l'érosion différentielle peut être considérée comme le principal facteur de vulnérabilité des matériaux de construction étudiés en raison d'une part de son efficacité à engendrer des pertes de matière importantes, et d'autre part de la représentation importante des matériaux comportant des caractéristiques associées au faciès *caliche*, particulièrement sensibles à ce relai de processus.

1.1.2. Néoformation de calcite par biominéralisation : un facteur de durabilité

Si l'érosion différentielle constitue un facteur de vulnérabilité important, les analyses pétrographiques ont également montré des facteurs de durabilité dans les matériaux de construction étudiés. Des observations par microscopie électronique couplées à l'étude pétrographique de lames minces ont mis en évidence la présence de phénomènes de biominéralisation et de recristallisation secondaire. Ces derniers ne sont pas étonnants dans des matériaux issus de formations secondaires et résiduelles dans lesquels certains processus pédogénétiques sont à l'œuvre, et peuvent contribuer à la durabilité de ces formations.

En effet, dans les échantillons présentant des caractéristiques proches du faciès *caliche*, les différentes zones de porosité montrent des signes de recristallisation secondaire et de biominéralisation à différents degrés. Ces processus se traduisent par la présence de calcite aciculaire (des nano-aiguilles de calcite) à l'intérieur des pores, caractéristiques des processus pédogénétiques dans les encroûtements carbonatés lorsque les ions magnésiens inhibent la croissance latérale des cristaux de calcite. Ces aiguilles de calcite peuvent former de véritables ponts entre les deux extrémités des zones de porosité (Fig. VIII-3a) ou se concentrer en « nids » (Fig. VIII-3b), et combler entièrement les macropores lorsque le degré de biominéralisation est très avancé,

contribuant à redonner une cohérence à la roche (Fig. VIII-4). Les observations par microscopie électronique ont également permis d'attester la présence de ces nano-aiguilles de calcite (Fig. VIII-5a), que l'on retrouve dans les pores de la roche. En revanche, l'observation – toujours en microscopie électronique – d'un échantillon recouvert d'un biofilm noir (Fig. VIII-5b) n'a étonnamment pas révélé la présence de structure organique à la surface de la roche. Le recouvrement biologique cyanobactérien serait à priori complétement calcifié et nous ne pourrions observer que des reliquats de ces organismes et des structures minérales associées à des processus de biominéralisation.

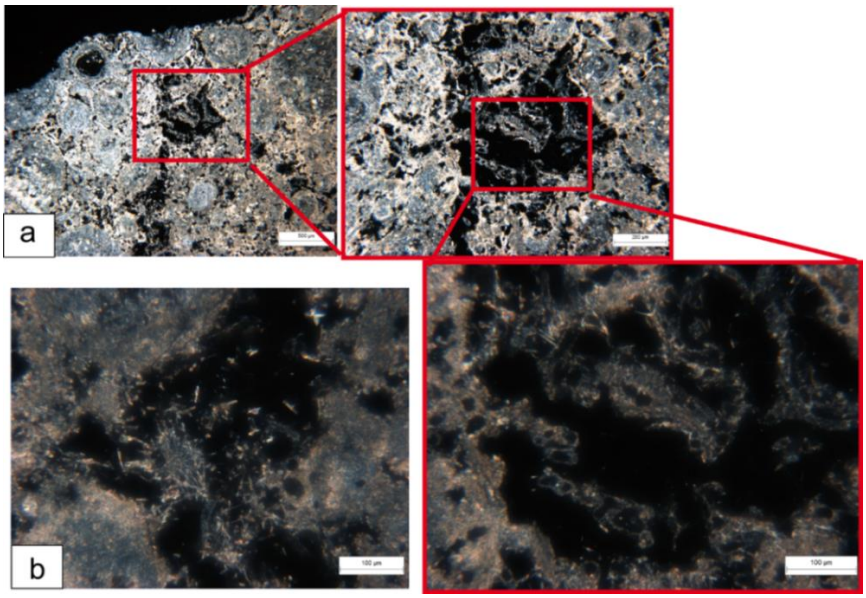


Fig. VIII-3. Observation en lame mince de ponts (a) et de nids (b) de nano-aiguilles de calcite sur l'échantillon XPU-06 en lumière polarisée.

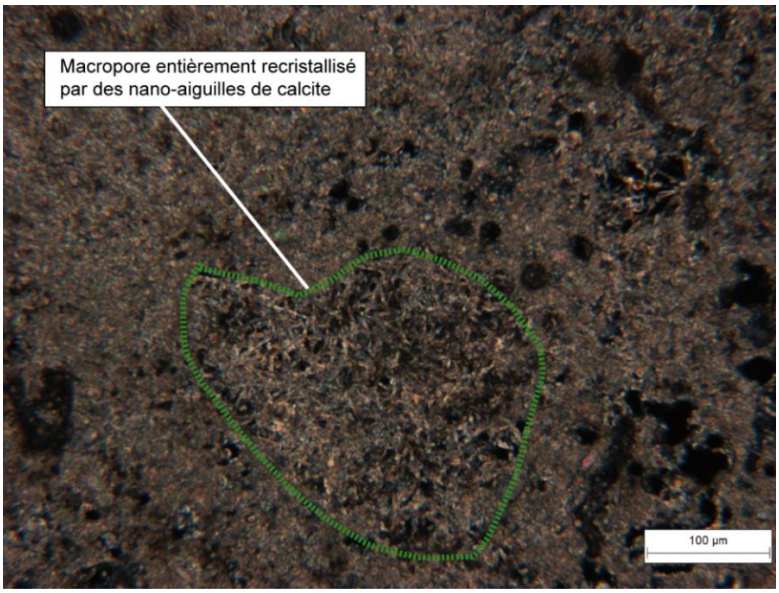


Fig. VIII-4. Macropore entièrement recristallisé par des nano-aiguilles de calcite, observé en lumière polarisée sur l'échantillon RB-01.

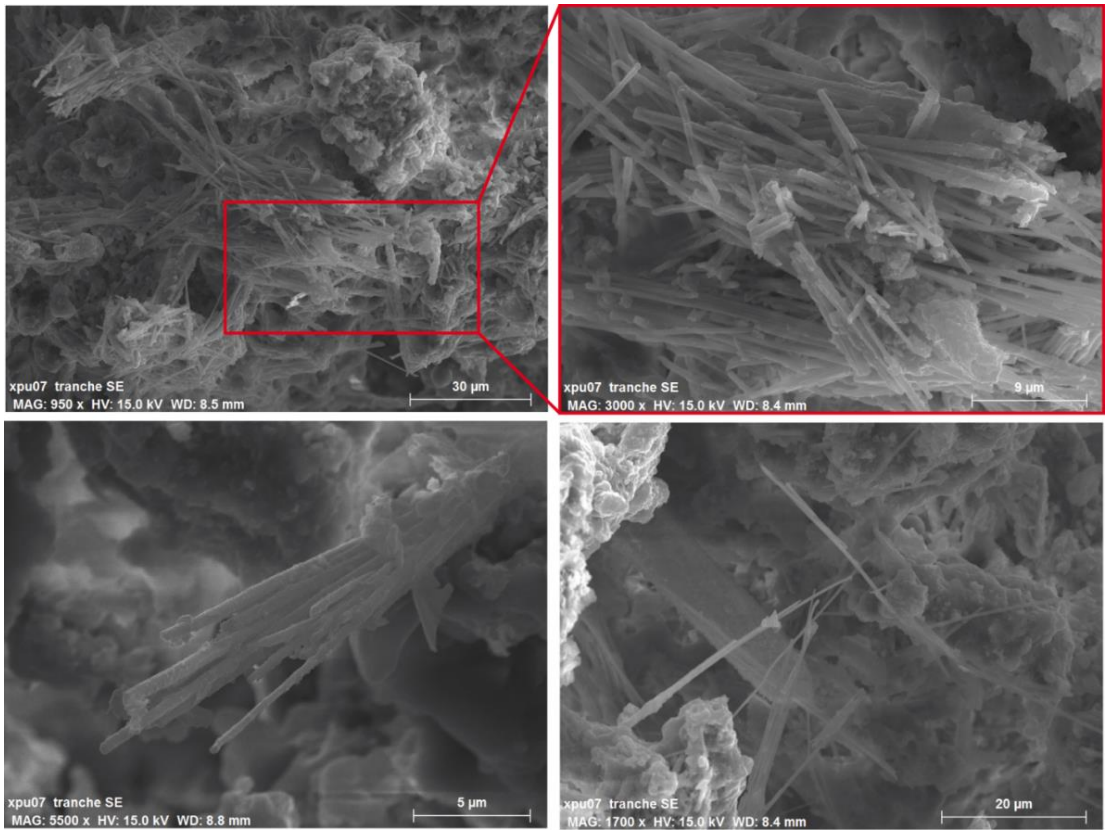


Fig. VIII-5a. Observations en microscopie électronique de calcite aciculaire dans la porosité de l'échantillon XPU-07.

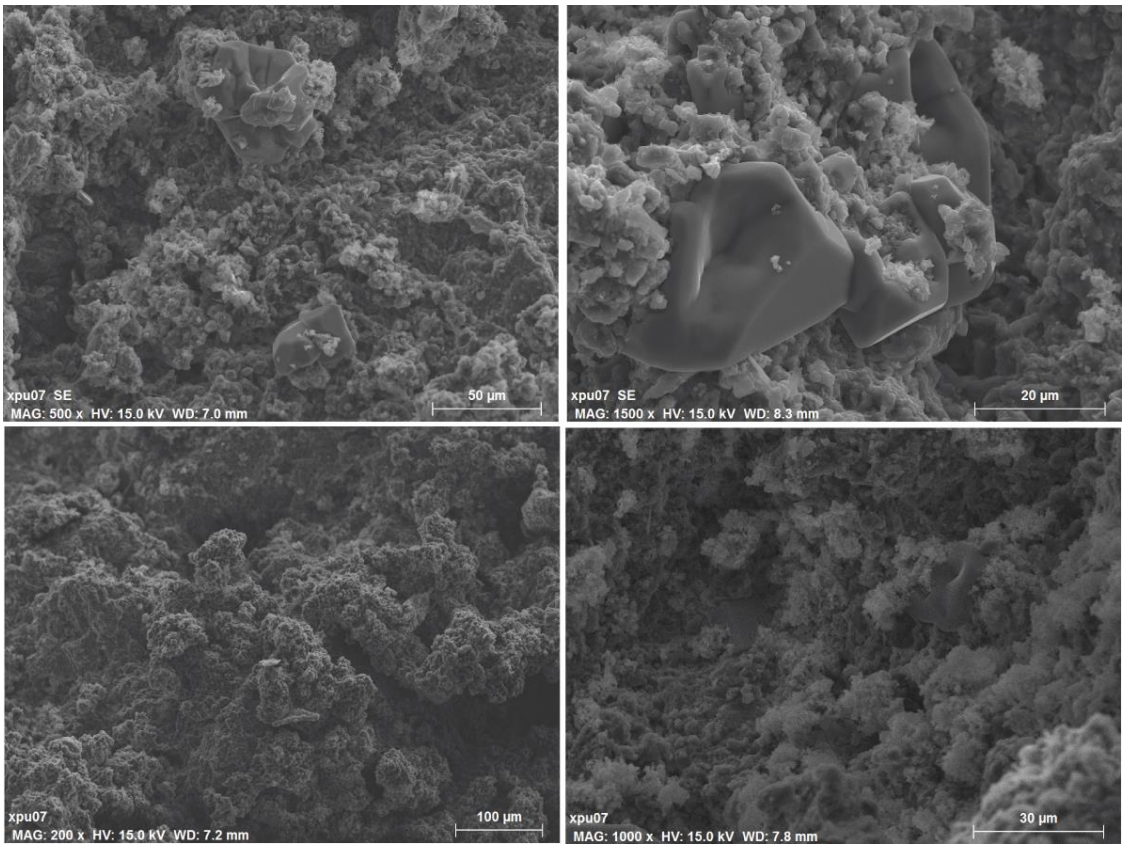


Fig. VIII-5b. Vue de la surface de l'échantillon XPU-07 observé par microscopie électronique, montrant l'absence de structures organiques vivantes.

La néoformation de calcite est ainsi essentiellement observable sur les échantillons provenant du site éponyme Río Bec, dans lesquels la structure est généralement très homogène. Il reste à déterminer les facteurs qui favorisent les phénomènes associés de recristallisation secondaire et de biominéralisation au regard de la littérature. En effet, s'ils sont communs dans les horizons pédogénétiques où les phénomènes de bioturbation et le caractère « vivant » des sols les favorisent, nous travaillons ici sur des matériaux de construction, certes issus des formations secondaires résiduelles, mais qui ont été extraits de leur gisement et insérés dans un ensemble architectural. Pour le moment, il est important de retenir que la durabilité des matériaux dont les caractéristiques sont associées au faciès *caliche* est directement dépendante de l'équilibre entre la progression de la dissolution préférentielle de la micrite et celle de la néoformation de calcite par biominéralisation.

Au-delà de ce constat, et étant donné l'imbrication des deux faciès dans la quasi-totalité des matériaux observés, l'érosion différentielle est susceptible de produire des effets de retrait sur les parties constituées du faciès *caliche* – les plus vulnérables – et de laisser les parties constituées du faciès laguno-continental dolomitique – les plus robustes – en saillie. L'état de conservation des matériaux ainsi détériorés peut donc être considéré comme médiocre si l'on s'en tient à une évaluation visuelle et macroscopique (Fig. VIII-6).

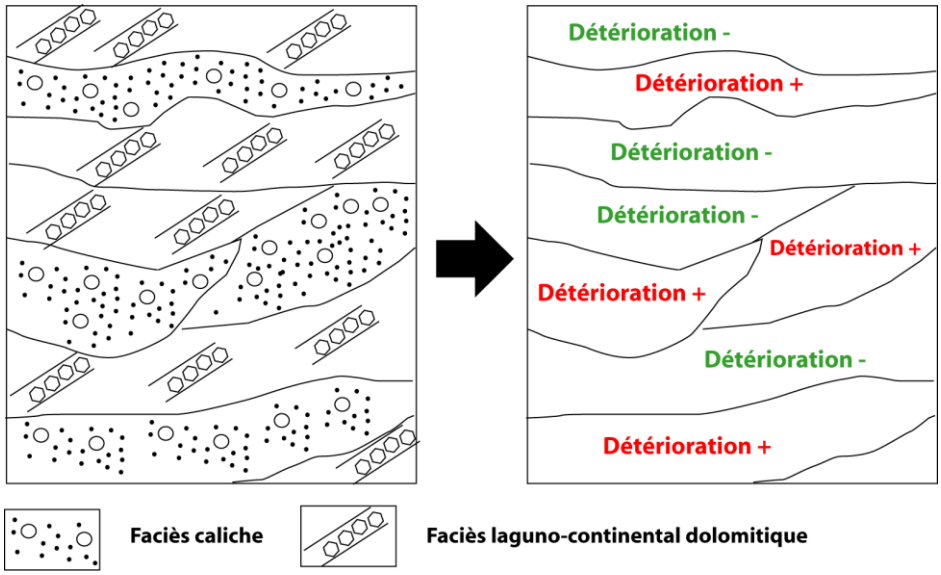


Fig. VIII-6. Imbrication des faciès et traduction en termes d'érosion différentielle dans un matériau de construction hypothétique.

A l'issue de la caractérisation des facteurs de contrôle intrinsèques, il est donc apparu que la vulnérabilité et la durabilité des matériaux de construction du secteur Río Bec sont essentiellement conditionnées par deux principaux facteurs. Tout d'abord, la variabilité des faciès carbonatés au sein des matériaux qui induit d'une part des réponses différentes aux agressions climatiques en fonction de leurs caractéristiques, et d'autre part un rapport de force entre la progression des mécanismes de dissolution préférentielle et celle des processus de biominéralisation secondaire. Néanmoins, il convient de toujours garder à l'esprit l'impact de la morphologie des structures, dictée par le dispositif architectonique, qui détermine la configuration d'un système de pentes particulier sur lequel l'efficacité de tel ou tel processus érosif est accrue ou amoindrie. Cependant, si la caractérisation des facteurs intrinsèques a évoqué les différentes morphologies des vestiges (Fig. V-2, p. 170), la collecte de données sur ces modalités s'est avérée complexe à mettre en place et trop chronophage à réaliser. Enfin, la colonisation biologique, par la présence des recouvrements et l'action des micro-organismes, détermine un équilibre ou un déséquilibre entre biodétérioration, bioprotection et biostabilisation. Ces équilibres fragiles sont, dans une large mesure, dépendants des facteurs de contrôle extrinsèques associés aux paramètres climatiques et au niveau de stress environnemental auquel les édifices sont soumis.

1.2. Influence des paramètres climatiques sur l'efficacité des processus érosifs

La caractérisation des paramètres climatiques a permis de souligner la variabilité de la température et de l'humidité relative enregistrées à la surface de la pierre, en fonction de la saisonnalité du climat, de l'exposition des structures et des ambiances forestières et dégagées. Ces ambiances climatiques variables commandent différents processus érosifs en fonction des paramètres climatiques et des amplitudes hygrothermiques. Nous tenterons donc ici de d'évaluer l'efficacité de ces processus au regard dans un premier temps de la saisonnalité des paramètres climatiques, et dans un deuxième temps des différentes ambiances climatiques dans lesquelles les structures s'inscrivent.

1.2.1. Saisonnalité de l'efficacité des processus

Les trois saisons identifiées lors de la caractérisation des paramètres climatiques se distinguent par la variation de la température, de l'humidité relative, et des amplitudes hygrothermiques enregistrées à la surface des pierres qui ont été monitorées. Ont ainsi été différenciées les saisons : sèche, des pluies, et de transition (Fig. VIII-7).

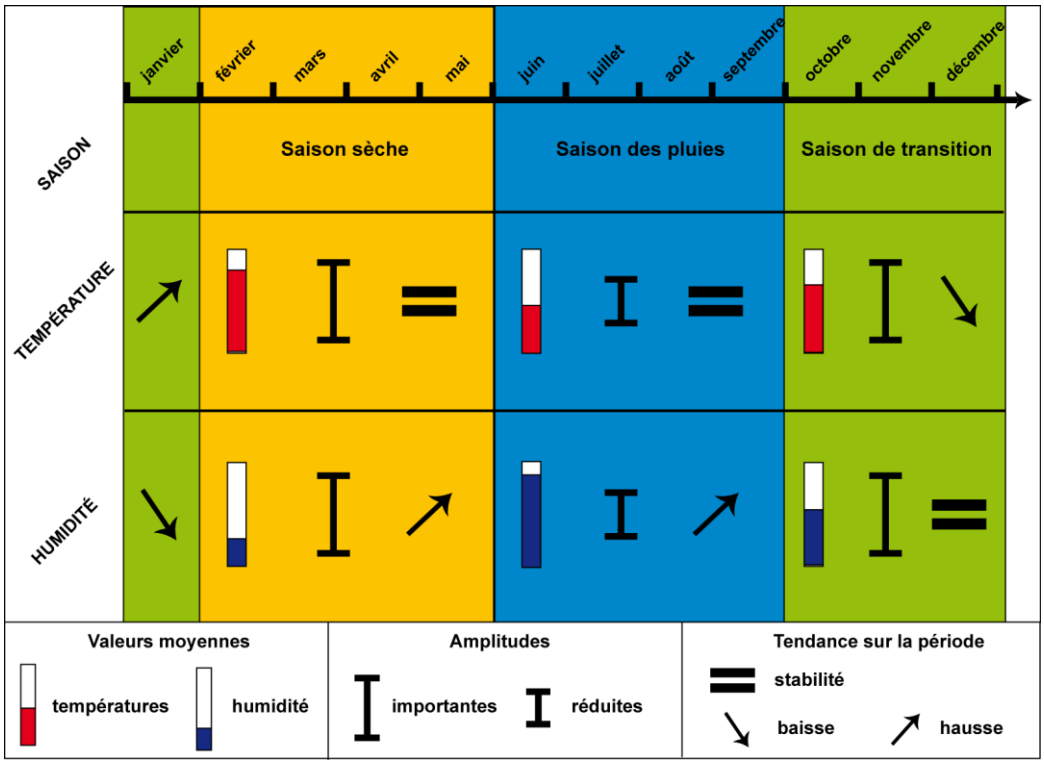


Fig. VIII-7. Schéma synthétique de la saisonnalité des paramètres climatiques.

Pour chacune des trois saisons, certains processus sont plus susceptibles d'entrer en action et de voir leur efficacité s'accroître. Lors de la saison sèche, elle-même marquée par des précipitations ponctuelles relativement intenses, les fortes températures sont à l'origine des fortes amplitudes hygrothermiques qui sont responsables d'alternances marquées d'humectation et de dessiccation des matériaux. Ces alternances favorisent dans une large mesure le gonflement et la rétraction des argiles incorporées dans les matériaux calcaires, qui exercent alors une pression mécanique importante pouvant fragiliser les structures internes de la roche. Rappelons que des argiles ont été identifiées dans les échantillons de matériaux prélevés, que ce soit par observation en lames minces (Fig. V-12, p. 181) ou par analyse de la composition chimique par rayons X (Fig. V-7, p. 177). Les fragilisations induites par ces alternances humectation-dessiccation favorisent donc des processus de détérioration mécanique tels que le

délitage ou la desquamation, dont les signatures érosives sont largement représentées sur les édifices étudiés.

Lors de la saison des pluies, l'humidité forte et constante due aux pluies abondantes est le principal paramètre climatique à influer sur les processus érosifs. En effet, cette forte humidité va largement favoriser les processus de dissolution dans lesquels l'eau pénètre à l'intérieur de la porosité de la roche et entraîne des pertes de matière par solubilisation. Ce processus de détérioration chimique est extrêmement efficace sur les calcaires, dans lesquels les carbonates de calcium sont des candidats idéaux à la prise en charge par solubilisation, et d'autant plus efficace que l'eau est chargée en dioxyde de carbone. En survenant directement à la suite d'une saison ou les matériaux ont été « préparés » par les alternances humectation-dessiccation qui les ont fragilisés et ont favorisé les processus mécaniques, la dissolution est capable de donner lieu à des pertes de matière importantes. En effet, les eaux pourront profiter des fragilités au sein de la roche pour lessiver les matériaux en profondeur et seront capables de mobiliser les grains précédemment désagrégés par solubilisation. Malgré les amplitudes hygrothermiques réduites, la saison des pluies est donc, en raison de la favorisation des processus de dissolution, une période au cours de laquelle les pertes de matière sont importantes, ces pertes sont cependant moins visibles à la surface de la pierre.

Au cours de la saison de transition, les taux d'humidité relative baissent progressivement puis se stabilisent à niveau médian, plus élevé qu'en saison sèche, plus bas qu'en saison des pluies. Les processus de dissolution sont donc encore capables d'agir conjointement aux processus de détérioration mécanique, dont l'efficacité est à nouveau favorisée par les amplitudes hygrothermiques qui retrouvent un niveau élevé, mais qui sont surtout plus marquées à l'échelle journalière (Fig. V-17, p. 190). Les alternances humectation-dessiccation sont alors encore plus rapides et plus fréquentes qu'en saison sèche au cours de laquelle les températures sont plus stables. C'est donc au cours de la saison de transition que les paramètres climatiques sont les plus susceptibles d'avoir des effets délétères sur l'érosion des matériaux.

1.2.2. Morphologie des structures et ambiances climatiques forestières ou dégagées

Au-delà de cette interprétation de l'expression purement extrinsèque des paramètres climatiques, il convient également de souligner que les résultats de leur caractérisation ont également mis en exergue les variations induites par l'environnement immédiat des structures, forestier ou dégagé, et par l'orientation des structures. Ces variations impliquent, à l'instar de la saisonnalité des paramètres climatiques, des disparités dans l'entrée en jeu ou l'efficacité de tel ou tel processus érosif. Afin de souligner ces disparités, la caractérisation des paramètres climatiques selon les ambiances climatiques et l'orientation des structures doit être interprétée conjointement aux résultats du diagnostic de la dynamique érosive et de la quantification de l'érosion.

Dans une large mesure, l'exposition aux agents atmosphériques est susceptible de varier en fonction de la morphologie du bâti archéologique, pouvant induire des effets d'abri, des formations de saillies ou de rentrants. Ce rôle de la morphologie dans l'exposition aux agents atmosphériques peut être mis en évidence par les résultats du diagnostic de la dynamique érosive sur les tours de la façade nord de la structure 5N2, sur lesquelles les sections formant les angles extérieurs de l'édifice montrent un état de détérioration plus avancé (Fig. VI-11 p. 218 et VI-12, p. 219). Si les résultats de quantification de l'érosion menée sur ces mêmes portions de bâti (Fig. VII-5 et Tab VII-3 p. 252) ne confirment pas cette tendance – en raison des limites de la méthode qui seront soulignées dans la conclusion de ce travail – l'exemple du mur de la structure V-A de Becán est à cet égard tout à fait illustratif. En effet, un simple effet d'abri dû à la présence d'une demi-voûte au-dessus d'un parement induit des variations importantes dans l'expression des paramètres climatiques, avec une humidité relative minimale supérieure de plus de 8% et des températures minimale et maximale supérieures de 1°C sur la partie non abritée et davantage exposée aux agents atmosphériques (Fig. VI-25, p. 231), et enfin une colonisation extensive par un biofilm noir cyanobactérien. Un effet d'abri serait donc susceptible d'induire une rétention d'humidité inférieure sur les sections de parement abritées, avec une dessiccation plus rapide et donc une efficacité accrue des processus de détérioration mécanique tels que le délitage ou le creusement, comme cela est confirmé par les signatures érosives relevées sur les différentes parties du mur de la structure V-A (Fig. VI-21, p. 226).

Si les effets microtopographiques induits par la morphologie du bâti sont donc susceptibles de modifier les régimes d'érosion et les processus érosifs associés aux paramètres climatiques qu'ils tempèrent ou accentuent, le couvert végétal, et notamment l'environnement forestier aux abords immédiats des vestiges semble également impliquer des variations dans l'expression des agents atmosphériques. La comparaison des résultats de monitoring climatique effectué sur les sites de Xpuhil et Xpuhil II (Figs. V-21, 22 et 23, pp. 196 à 198) montre que le couvert forestier tempère les amplitudes hygrothermiques, et inscrit les monuments dans un microclimat plus frais et plus humide. Cette ambiance climatique favorise ainsi les processus d'érosion chimique comme la dissolution, dont l'efficacité est accrue par les taux d'humidité relative élevés et constants, au détriment des processus de détérioration mécanique dont l'efficacité est amoindrie en raison des faibles amplitudes thermiques qui induisent des alternances humectation-dessiccation moins fréquentes. Malheureusement, le site de Xpuhil II se réduisant à une seule structure à quatre façades, la faible représentativité des données qui auraient pu y être récoltées, en comparaison du nombre de parements disponibles sur le site de Xpuhil, a directement dissuadé leur collecte. En revanche, le site éponyme de Río Bec, en raison de la situation de ses vestiges au cœur de la forêt tropicale, avec un couvert végétal bien plus proche des structures que dans les autres sites étudiés, peut apporter des éléments d'interprétation se rapprochant d'un site se trouvant sous couvert forestier. Sur ce site archéologique, on note une surreprésentation des signatures érosives associées à des processus de détérioration mécanique, notamment la desquamation et le délitage, mais aussi du processus chimique de dissolution, dont la représentation est similaire à celle observée sur le site de Becán (Fig. VI-5, p. 209). En outre, l'état de détérioration global des parements y est plus élevé (Fig. VI-4, p. 208) et les modalités de colonisation biologique sont dominées par des taux de recouvrement élevés par des biofilms noirs cyanobactériens (Fig. VI-6, p. 210).

1.2.3. Le gradient hygrothermique des orientations

La comparaison des différentes orientations des structures par rapport aux quatre points cardinaux – auxquels les constructeurs mayas ont pris un soin particulier d'aligner leurs édifices – a également permis de souligner un autre facteur de variabilité de l'expression des paramètres climatiques. En effet, les différentes expositions se différencient par un gradient progressif nord, ouest, sud puis est, allant d'une ambiance climatique marquée par de basses températures, une humidité relative importante, et

des amplitudes hygrothermiques réduites à une ambiance climatique plus chaude, moins humide, où les amplitudes hygrothermiques sont plus importantes (Fig. V-20, p. 194). Du nord à l'est, en suivant ce gradient, les processus favorisés sont la dissolution et les processus chimiques, dont l'efficacité est accrue dans les ambiances climatiques fraîches et humides, puis viennent les processus mécaniques, dont la desquamation, le délitage et le creusement, dont l'efficacité est surtout accrue par les amplitudes hygrothermiques plus élevées.

Par ailleurs, l'analyse des correspondances multiples pratiquée sur les données relatives à l'ensemble des parements du secteur (Fig. VI-8, p. 213) semble confirmer cette tendance en montrant que l'orientation des parements affecte la distribution des signatures érosives. Les marques de la dissolution sont ainsi davantage observées sur les parements extérieurs des structures et sur ceux orientés au nord, alors que les formes associées aux processus mécaniques de délitage et de creusement s'observent majoritairement sur les parements orientés au sud et à l'est.

Au total, l'étude des paramètres climatiques a permis d'aboutir à une caractérisation fine des facteurs extrinsèques de la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Les matériaux, dont nous avons précédemment pointé les facteurs de durabilité et de vulnérabilité, sont donc susceptibles d'évoluer dans plusieurs ambiances climatiques distinctes en fonction de la morphologie du bâti archéologique, de l'environnement forestier ou exposé dans lequel il s'inscrit, et de l'orientation des structures par rapport aux points cardinaux. Ces deux ensembles de facteurs, intrinsèques et extrinsèques, interagissent pour déterminer le *modus operandi* de la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec (Fig. VIII-8).

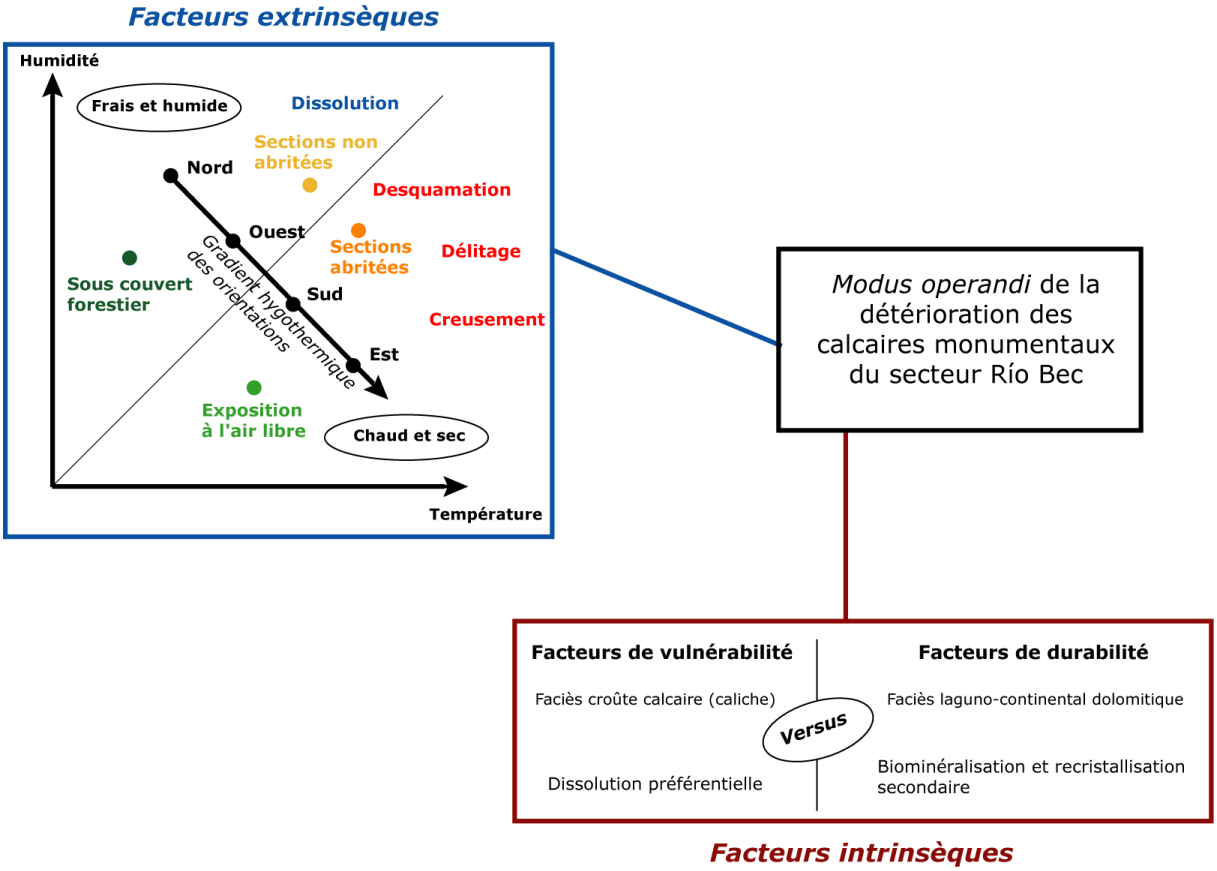


Fig. VIII-8. Synthèse des facteurs intrinsèques et extrinsèques déterminant le *modus operandi* de la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec.

Il convient dès lors d'une part de se pencher sur le rythme de ce *modus operandi*, les probables relais de processus et effets de seuil qui le caractérisent, et d'autre part d'apprécier le rôle des agents biologiques qui recouvrent les vestiges du secteur.

2. *Modus operandi* de l'érosion des matériaux de construction dans le secteur Río Bec

Au cours de ce travail, plusieurs ensembles de résultats obtenus lors de l'étape de diagnostic de la dynamique érosive sont susceptibles de nous fournir des éléments d'interprétation permettant de caractériser le *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. En effet, l'analyse des correspondances multiples nous a permis d'établir des corrélations entre les différentes modalités prises par les parements étudiés en termes de signatures érosives, colonisation biologique et état de détérioration. D'autres analyses statistiques multivariées, pratiquées notamment sur les données issues du mur de la structure V-A de Becán et des panneaux à damiers de Xpuhil et Río Bec, peuvent également nous apporter des éléments de réflexion sur

d'éventuels relais de processus ou effets de seuil, et nous permettre d'apprécier avec plus de finesse le rôle de la colonisation biologique, entre biodétérioration, biostabilisation et bioprotection. Enfin, les résultats de quantification de l'érosion sont en mesure de nous fournir des données chiffrées pouvant renforcer ou nuancer notre interprétation, et d'évaluer les vitesses d'érosion des matériaux de construction.

2.1. Un relai de processus en quatre étapes

Lors de l'analyse des correspondances multiples pratiquée sur l'ensemble des parements du secteur (Fig. VI-8, p. 213), la première corrélation qui a été soulignée est celle qui existe entre les différentes modalités de l'état de conservation (de « bon état » à « très détérioré ») et la présence des signatures érosives sur les parements concernés. En effet, les parements en bon état de conservation sont associés aux signatures érosives de la dissolution, les parements peu détériorés à celles de la desquamation, les parements détériorés à celles du délitage, et les parements très détériorés à celles du creusement. Rappelons ici que la variable « état de conservation » a été incluse dans l'analyse des correspondances multiples en tant que variable illustrative, et que les scores obtenus par les modalités de cette variable n'ont donc pas contribué à la construction de l'espace factoriel, ce qui réduit les risques d'interprétation excessive de la covariance. En revanche, il convient également de souligner que cette variable est une variable subjective, dont les modalités ont été appréciées par l'auteur, sur la base entre autres des pertes de matière observées sur les matériaux de construction constitutifs des parements. Les processus mécaniques de délitage et de creusement sont en effet susceptibles d'induire des pertes de matières plus importantes que la desquamation, dont les écailles restent superficielles, et surtout que la dissolution, qui consiste surtout en un lessivage des éléments carbonatés à travers le réseau poreux, et dont les signatures sur l'épiderme rocheux se réduisent à un arrondissement des arrêtes anguleuses et à l'apparition de « vaguelettes » à la surface de la pierre.

Malgré cela, et tout en gardant la mesure imposée par les points précédents, la corrélation entre ces deux variables reste forte et mérite une attention particulière, d'autant plus si on la considère au regard des résultats que nous avons interprétés précédemment. En effet, nous avons pu définir les paramètres climatiques qui conditionnent l'entrée en jeu et l'efficacité des processus érosifs, et nous disposons également de données sur les possibles concomitances et équilibres des processus

chimiques et mécaniques à travers les opérations menées sur les panneaux à damiers lors du diagnostic de la dynamique érosive. Le croisement de ces résultats et de leur interprétation rend donc tout à fait acceptable la proposition d'une interprétation de cette corrélation pour définir le *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Illustré par la figure VIII-9, ce dernier fonctionnerait hypothétiquement, sur un parement dont l'état initial est représenté par l'étape 0 sur la figure, selon les 4 étapes suivantes :

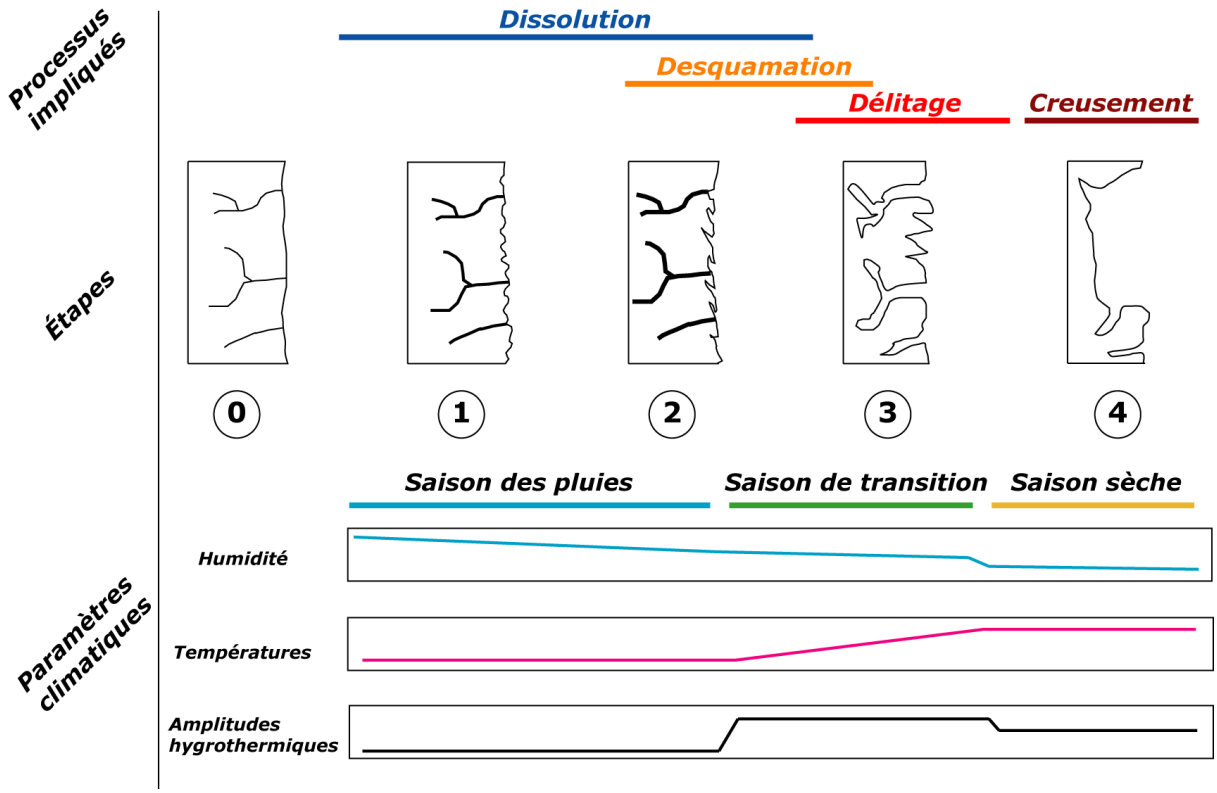


Fig. VIII-9. Proposition de *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, montrant pour chaque étape les processus impliqués en fonction des paramètres climatiques.

Étape 1 :

Le premier processus à entrer en jeu, à la faveur des précipitations et de l'humidité relative élevée en saison des pluies, est la dissolution. L'eau pénètre le réseau poreux de la pierre et lessive les éléments carbonatés qui sont précipités à la surface de l'épiderme rocheux et former un calcin de surface. Lors de ce phénomène, les sels solubles contenus dans la pierre vont également migrer vers la surface de cette dernière, où les premières signatures érosives apparaissent : vaguelettes et cupules de dissolution.

Étape 2 :

Entre la fin de la saison des pluies et le début de la saison de transition, la baisse relative de l'humidité et l'augmentation des amplitudes hygrothermiques atténue l'efficacité de la dissolution qui, si elle continue encore à agir, laisse progressivement sa place à la desquamation. Des écailles superficielles apparaissent à la surface de la pierre, en raison de la cristallisation des sels solubles qui y ont été déposés précédemment, et des cycles de gonflement et de rétraction des argiles à la faveur des alternances d'humectation et de dessiccation de la pierre. Après leur chute, les écailles de desquamation emportent avec elles le calcin de surface qui protège la pierre et laissent la matière « à nu », prête à être prise en charge par les processus purement mécaniques qui interviennent lors de l'étape 3.

Étape 3 :

Les fortes amplitudes hygrothermiques de la saison de transition, couplées à la préparation de la pierre par les deux étapes précédentes, favorisent l'efficacité des processus de délitage qui viennent attaquer les lignes de faiblesse de la pierre. Ces lignes de faiblesse peuvent être dues à la structure des matériaux, notamment la présence du faciès croûte calcaire qui est plus vulnérable que le faciès laguno-continental dolomitique, mais également à des vides hérités de l'érosion de la matière autour du réseau poreux, comme cela est proposé sur la figure VIII-9. Quoi qu'il en soit, les processus de désagrégation mécanique des grains, laissés disponibles après la chute des écailles de desquamation et la perte du calcin de surface, prennent le relai et leur efficacité en termes de pertes de matière occulte complètement les signatures érosives relatives aux autres processus. Il est ainsi difficile d'affirmer que la dissolution, bien que par nature toujours active même si elle est atténuée, agisse encore de manière sous-jacente.

Étape 4 :

La dernière étape du *modus operandi* implique l'entrée en jeu du processus de creusement, qui intervient une fois que les parties de la pierre restées en suspens après la désagrégation des lignes de faiblesses sus-jacentes et sous-jacentes aient chuté par action de la gravité. La désagrégation granulaire peut dès lors affecter une surface plus importante de la pierre et continuer à entraîner des pertes de matière et des retraits élevés par rapport à la surface originelle, toujours favorisée par des amplitudes hygrothermiques élevées et une humidité relative basse. Comme pour l'étape 3, les

pertes de matière sont si importantes qu'elles occultent les possibles signatures érosives des processus d'érosion chimique. A ce sujet, on peut ajouter que les résultats de diagnostic de la dynamique érosive sur les panneaux à damiers de Becán et Río Bec (Fig. VI-32 et VI-33, pp. 239-240) montrent que les blocs présentant les signatures associées à une érosion mécanique importante (M4 et M5) ne présentent aucune signature associée à l'érosion chimique.

Au regard de cette proposition d'interprétation, il convient de souligner que ces quatre étapes, même si elles sont associées à des paramètres climatiques saisonniers, n'opèrent pas en une seule année. En effet, il faut voir ces étapes comme des modalités propres à chaque ensemble de paramètres climatiques défini par les saisons identifiées, qui se répètent chaque année. La progression entre les états de conservation successifs représentés sur la figure VIII-9 nécessite donc plusieurs années, voire décennies, avant d'aboutir. De même, si notre interprétation découle des résultats obtenus par des méthodes techniques et statistiques, elle est aussi induite par une connaissance des mécanismes de détérioration qui devra être discutée au regard de la littérature dans le chapitre suivant.

La proposition d'interprétation présentée ici est donc avant tout une grille de lecture, dont le but est de nous permettre d'apprécier plus finement les impacts du forçage induit par les interventions humaines. En revanche, cette grille de lecture ne peut pas être complète si elle n'inclut pas un facteur essentiel dans le contexte bioclimatique au sein duquel s'inscrivent les structures étudiées : le rôle de la colonisation biologique.

2.2. Le rôle de la colonisation biologique

Les différents résultats obtenus lors de l'étape de diagnostic de la dynamique érosive ont également permis de fournir des éléments d'interprétation pouvant conduire à une meilleure appréciation du rôle de la colonisation biologique. Avant d'interpréter les résultats qui ont trait aux variables qui leur sont associées, il convient de souligner que les travaux menés dans le secteur étudié ont avant toute chose confirmé l'omniprésence des recouvrements des vestiges par les microorganismes. En effet, qu'il s'agisse des biofilms noirs d'origine cyanobactérienne, des algues rosâtres assimilables à *Trentepohlia sp.*, ou encore des lichens blancs ou des recouvrements muscinaux,

l'ensemble des formes de colonisation biologique identifiées dans les travaux menés sur le secteur ont été retrouvées lors de la collecte de données. Afin de présenter les résultats de nos travaux ayant trait à ces organismes et leur rôle dans la détérioration des matériaux, nous nous intéresserons dans un premier temps à leur répartition, distribution et associations avec les processus érosifs, puis, dans un deuxième temps, à l'appréciation de leur action, entre détérioration, protection, et remédiation.

2.2.1. Logique de distribution des microorganismes et processus associés

L'analyse des correspondances multiples menée sur l'ensemble des parements du secteur Río Bec (Fig. VI-8, p. 213) a mis en évidence plusieurs corrélations des variables de colonisation biologique permettant d'expliquer leur distribution à la surface des matériaux de construction, ainsi que leur association aux différents processus érosifs. En effet, il apparaît que l'orientation des parements détermine largement la distribution des organismes colonisateurs sur les surfaces rocheuses. Les paramètres climatiques associés à chaque orientation favorisent donc la croissance et la subsistance de tel ou tel organisme.

Sur les parements exposés au sud, à l'ouest, ainsi que sur les parements extérieurs des structures, les biofilms noirs cyanobactériens sont davantage représentés, avec des taux de recouvrement importants. De même, sur le mur de la structure V-A de Becán, la partie B, davantage exposée que la partie A surmontée d'une demi-voûte, est également entièrement colonisée par ces biofilms cyanobactériens. On peut en déduire que ces organismes sont phototrophes, qu'ils ont besoin d'ensoleillement pour se développer et subsister, et qu'ils ne sont pas sensibles à l'exposition aux agents atmosphériques. Sur les parements exposés au nord et à l'est, les orientations les plus ombragées, se développent majoritairement les algues rosâtres, les lichens blancs, et les mousses. De plus, à la vue des corrélations établies entre les taux de recouvrement, ces organismes semblent se succéder et dépendre les uns des autres pour se développer. En effet, les lichens blancs apparaissent quasi-exclusivement sur des parements déjà recouverts par l'algue *trentepohlia sp.,* et se développent d'autant plus que les taux de recouvrement par cette dernière sont élevés. Il en va de même pour les mousses, qui apparaissent sur des parements colonisés par les algues roses et les lichens blancs, et se développent également d'autant plus que les taux de recouvrement par ces deux autres

organismes sont élevés. Ces trois agents biologiques évoluent donc en consortium et se développent par succession végétale. Il est en effet possible que les lichens blancs trouvent dans les algues roses une source de nutriments et un support de croissance, ce que les mousses sont susceptibles de trouver dans les lichens blancs (Fig. VIII-10).

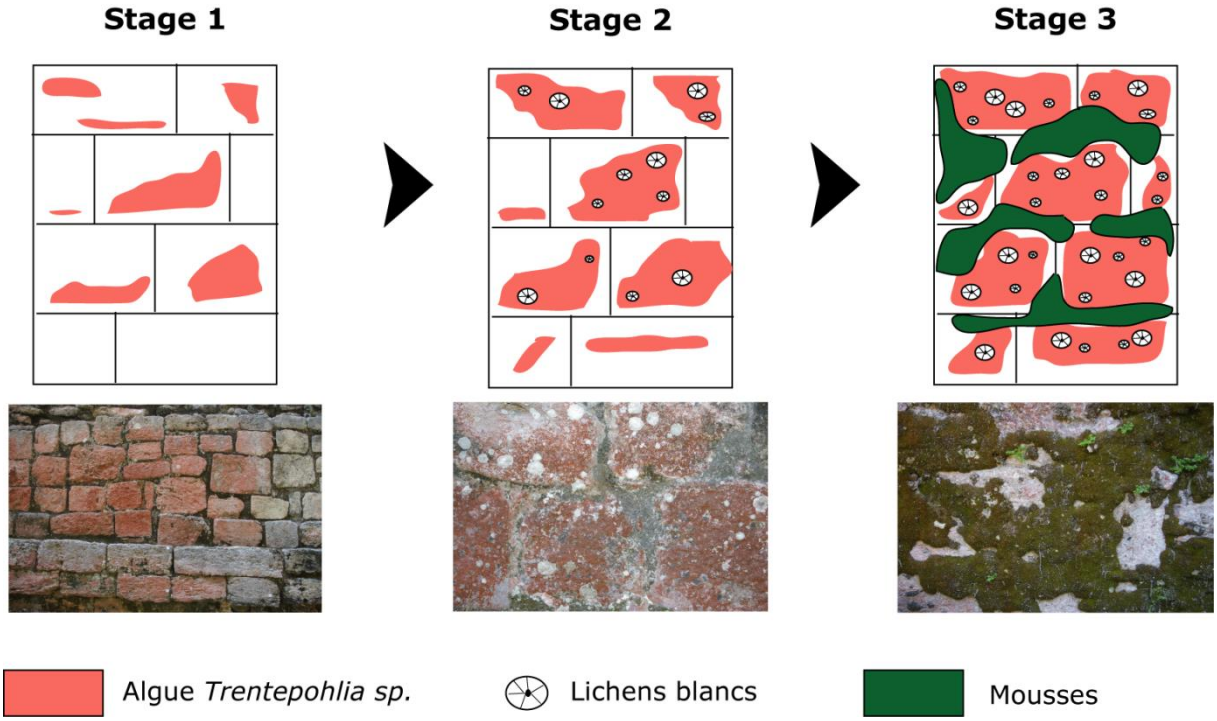


Fig. VIII-10. Stages progressifs de succession végétale du consortium algues roses-lichens blancs-mousses, identifié dans le secteur Río Bec par corrélation des taux de recouvrement végétal.

En ce qui concerne l'association des variables de colonisation biologique aux différentes signatures érosives, les résultats produits montrent surtout une corrélation positive entre les taux de recouvrement végétal élevés et la présence de dissolution et desquamation. Inversement, les signatures érosives associées aux processus mécaniques de délitage et de creusement sont corrélées négativement à ces taux de recouvrement. Ainsi, une corrélation positive est également avérée entre l'importance de la colonisation par les microorganismes et un état de détérioration peu avancé. On pourrait donc être tenté d'affirmer que la colonisation biologique protège les parements, comme cela est d'ailleurs très favorablement suggéré par le cas du mur de la structure V-A de Becán, où la partie B, entièrement colonisée par un biofilm cyanobactérien, est bien moins détériorée que la partie A, où ces agents biologiques sont absents.

Toutefois, si les biofilms sont en effet susceptibles de retenir l'humidité et de favoriser un régime d'érosion plutôt orienté vers une biodétérioration chimique plus lente, avec une efficacité accrue de la dissolution, il convient de nuancer cette corrélation en soulignant deux points. Premièrement, par leur croissance rapide, les recouvrements biologiques sont largement susceptibles de masquer les signatures érosives relatives aux processus mécaniques. Des matériaux ayant été affectés par ces derniers n'auraient donc pas été recensés comme tels. Deuxièmement, les processus de détérioration mécaniques sont également très efficaces en termes de pertes de matière, et interviennent lorsque les matériaux sont « à nu », que le calcin de surface ne protège plus l'épiderme rocheux, et que les grains de la roche sont directement mobilisables. Malgré cette nuance, force est de constater que les résultats confirmant cette tendance se répètent et méritent une exploration plus poussée afin de déterminer plus finement le rôle de ces microorganismes dans le secteur étudié.

2.2.2. Biodétérioration *versus* bioprotection

Sur l'ensemble de ce qui a été produit, trois résultats peuvent être ciblés pour tenter de mieux apprécier le rôle des microorganismes : les résultats portant sur le mur de la structure V-A de Becán, ceux issus de la quantification de l'érosion sur la fenêtre photogrammétrique XPU-16, et ceux issus du diagnostic de la dynamique érosive sur les panneaux à damiers de Becán et Río Bec.

Le mur de la structure V-A de Becán présente en effet un fort contraste dans la distribution de la colonisation biologique et la spatialisation de l'état de détérioration des matériaux. La partie A est abritée par une demi-voûte, la colonisation biologique y est quasi-inexistante, et la détérioration est avancée. La partie B n'est pas abritée, entièrement recouverte d'un biofilm cyanobactérien, et en bon état de conservation (Fig. VI-14, p. 221). Ici, les résultats confirment donc que le recouvrement important par les biofilms cyanobactériens est associé à un état de détérioration minimal. De plus, même si la plupart des signatures érosives relevées sur la partie B correspondent aux processus de dissolution et de desquamation, certaines correspondent également au délitage. Ces processus sont donc également susceptibles d'agir sur des surfaces rocheuses recouvertes par les microorganismes, ces derniers ne masquant pas systématiquement leurs signatures. En termes de paramètres climatiques (Fig. VI-25, p. 231), la partie B évolue dans une ambiance légèrement plus chaude, mais surtout plus

humide, ce qui favorise l'efficacité des processus de dissolution. Le biofilm paraît en effet retenir l'humidité à un niveau plus important que sur la partie A, où il est absent. Il convient ici de rappeler que les capteurs de monitoring climatique ont été placés sur le biofilm pour la partie B : ce sont donc l'humidité relative et la température à la surface de ce dernier qui ont été enregistrées. En termes de vitesse d'érosion, rappelons également que le retrait moyen calculé sur la partie A est de 2 cm alors qu'il n'est que de 0,07 cm sur la partie B. Il apparaît donc, selon toute vraisemblance, que le biofilm cyanobactérien qui a colonisé la partie B du mur de la structure V-A de Becán a permis l'évolution de cette section de parement dans une ambiance microclimatique ayant favorisé la prédominance d'un régime de biodétérioration chimique lente. En outre, le biofilm constitue en lui-même une couche protectrice, à l'interface entre la roche et l'atmosphère. Au final, les processus de détérioration mécanique, entrant en jeu lorsque les grains de la roche sont à nu, ont ainsi épargné cette surface qui présente des valeurs de retrait très faibles et donc des pertes de matière tout à fait minimes, et ce grâce aux agents biologiques qui la recouvrent.

Un contraste net entre une surface rocheuse recouverte par un biofilm cyanobactérien, bien conservée, et une surface rocheuse non colonisée et davantage détériorée se retrouve sur la fenêtre XPU-16, sur le site de Xpuhil (Fig. VIII-11). Comme pour le mur de la structure V-A de Becán, les processus de détérioration mécanique ont préférentiellement affecté les parties du parement qui ne sont pas recouvertes par le biofilm cyanobactérien, entraînant des pertes de matières plus importantes. En effet, un retrait maximal de 4,65 cm, soit 0,22 cm par an (contre un retrait moyen de 0,16 cm, soit 0,01 cm par an sur l'ensemble de la surface étudiée) a été calculé sur cette fenêtre photogrammétrique (Tab. VII-2, p. 250). Ce retrait maximal est enregistré sur la partie affectée par un phénomène de creusement, aux abords d'un nodule de chaille resté en suspens. Ici aussi, les résultats plaident en faveur d'une protection du parement par le biofilm qui maintient une humectation plus importante sur la surface protégée et favorise ainsi la prédominance des processus d'érosion chimique aux dépens des processus d'érosion mécanique. Ces derniers sont donc limités d'une part par la couche protectrice constituée par le biofilm, et d'autre part par la modification ultra locale des paramètres climatiques qu'il induit.

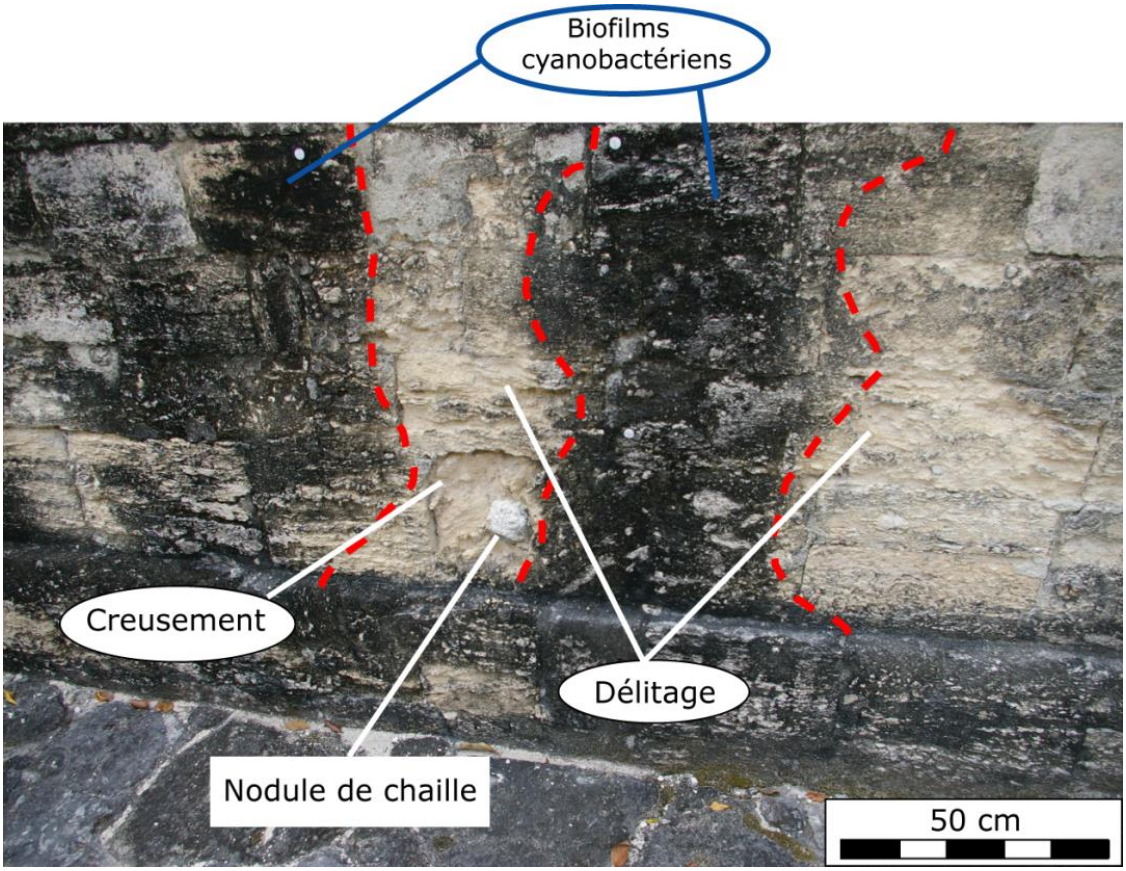


Fig. VIII-11. Mise en évidence du contraste de conservation en fonction de la colonisation biologique sur la fenêtre XPU-16, sur le site de Xpuhil.

Enfin, les résultats de l'analyse en composantes principales des variables étudiées sur les panneaux à damiers du secteur Río Bec (Fig. VI-34, p. 241) vont également dans le même sens. La présence de recouvrements par les biofilms cyanobactériens est très fortement associée à la présence de signatures érosives relatives aux processus chimiques, ce qui est particulièrement visible sur le panneau RIO-5 (Fig. VI-31, p. 237), et inversement corrélée à celles propres aux processus mécaniques. Aucun bloc constitutif des panneaux à damiers du secteur étudié n'est donc à la fois colonisé par un biofilm cyanobactérien et affecté par des processus de détérioration mécanique. Ici aussi, ces recouvrements biologiques seraient à considérer comme protecteurs des éléments iconographiques, malgré l'altération chromatique et le dommage esthétique qu'ils constituent, par leur couleur noirâtre et leur texture duveteuse. L'analyse en composantes principales des variables étudiées sur les panneaux à damiers du secteur Río Bec vient aussi confirmer la subsistance en consortium des algues roses *trentepohlia sp.* et des lichens blancs, qui sont ici aussi très positivement corrélés, comme cela est particulièrement visible sur le panneau iconographique RIO-1 (Fig. VI-29, p. 235).

Au total, les résultats ayant trait à la colonisation biologique des matériaux de construction dans le secteur Río Bec ont mis en évidence une logique de distribution des microorganismes en fonction de l'orientation des structures, mais également une croissance et une subsistance de certains d'entre eux sous la forme d'un consortium et d'une succession végétale. De surcroît, la plupart des éléments d'interprétation croisant les données de colonisation biologique et de variables relatives à la détérioration semblent aller dans le sens d'un rôle protecteur des microorganismes pour les vestiges. Ce rôle tient à la nature même de ces recouvrements, qui se posent en couche protectrice et modératrice des agents atmosphériques, et par la modification des paramètres climatiques qu'ils induisent à une échelle ultra locale. L'analyse des différentes situations illustrant ce phénomène nous pousse cependant à prendre en considération le fait que la colonisation d'une surface rocheuse par un biofilm est largement dépendante de la morphologie du bâti, laquelle peut être commandée par les interventions humaines dont il a fait l'objet.

3. Impact des interventions humaines : du *modus operandi* aux crises érosives localisées

Caractériser et évaluer l'impact des interventions humaines, en tant que forçage anthropique sur un système régi par l'équilibre entre les facteurs intrinsèques et extrinsèques – c'est-à-dire le *modus operandi* défini précédemment – constitue l'objectif principal de ce travail. A travers l'étape d'anamnèse des structures étudiées, nous avons cherché à reconstituer l'histoire récente des vestiges, depuis leur redécouverte, et à recenser les interventions humaines dont ils ont fait l'objet. Cette étape a permis l'acquisition d'un contrôle chronologique fiable et suffisamment précis pour être utilisé dans les autres étapes de travail, notamment celle de quantification de l'érosion. Nous avons également tenté d'établir une classification des structures en fonction de leur trajectoire d'intervention, définie par la durée de leur exposition aux agents atmosphériques et leur degré d'intervention.

Au total, l'anamnèse des structures nous a fourni une grille de lecture afin de mieux interpréter certains résultats des étapes de travail suivantes, et pouvoir identifier l'impact des interventions humaines sur l'érosion des matériaux de construction. Cet impact doit être apprécié à deux échelles différentes : au niveau des structures étudiées, où la trajectoire d'intervention peut commander des modalités d'érosion spécifiques, et

au niveau ultra local, où les interventions humaines ponctuelles peuvent être à l'origine de véritables crises érosives localisées.

3.1. Trajectoires d'interventions et modalités d'érosion

La classification des trajectoires d'intervention des structures, établie lors de l'étape d'anamnèse en fonction de la durée de leur exposition post-dégagement et de leur degré d'intervention, a permis de distinguer quatre groupes d'édifices (Fig. VIII-12).

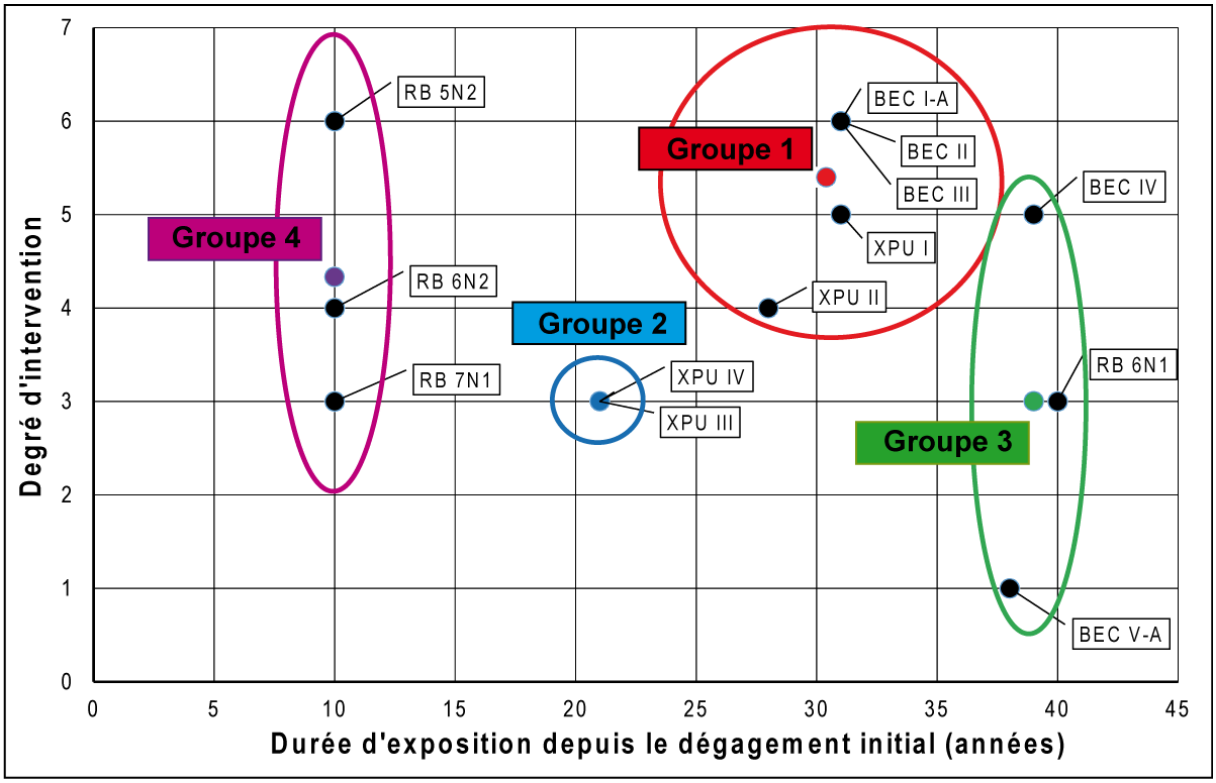


Fig. VIII-12. Classification établie lors de l'étape d'anamnèse des structures.

L'appartenance à chacun de ces groupes a ensuite été projetée en tant que variable supplémentaire sur l'espace factoriel de l'analyse des correspondances multiples permettant la visualisation de l'ensemble des variables étudiées (Fig. VI-8, p. 213). Or, la distribution éclatée des modalités sur cet espace factoriel n'a pas permis d'identifier clairement les corrélations entre ces dernières et les autres variables, notamment l'état de conservation des parements du secteur, et les signatures érosives relevées. Afin d'être en mesure d'interpréter l'impact des trajectoires d'intervention des structures sur leur détérioration, il convient donc de revenir à des analyses statistiques à deux variables et

de comparer la classification établie d'une part à l'état de conservation des parements de chaque groupe, d'autre part aux signatures érosives observées.

En étudiant l'état de conservation des parements des structures de chaque groupe séparément (Fig. VIII-13), on note que les profils sont finalement assez différents. Le groupe 1, qui correspond à des structures très intervenues sur les sites de Becán et Xpuhil, se distingue par une proportion plus importante de parements en bon état de conservation. Les opérations de restauration et de consolidation sur ces sites, dont les trajectoires d'interventions sont relativement similaires, sont donc susceptibles d'avoir amélioré l'état de conservation général des parements. Le profil du groupe 4, avec aucun parement très détérioré et relativement peu de parements détériorés, nous laisse penser que plus la durée d'exposition des parements (d'une dizaine d'années sur ce groupe) est importante, plus leur état de détérioration est avancé. La similarité des profils des groupes 2 et 3 vient cependant nuancer cette interprétation.

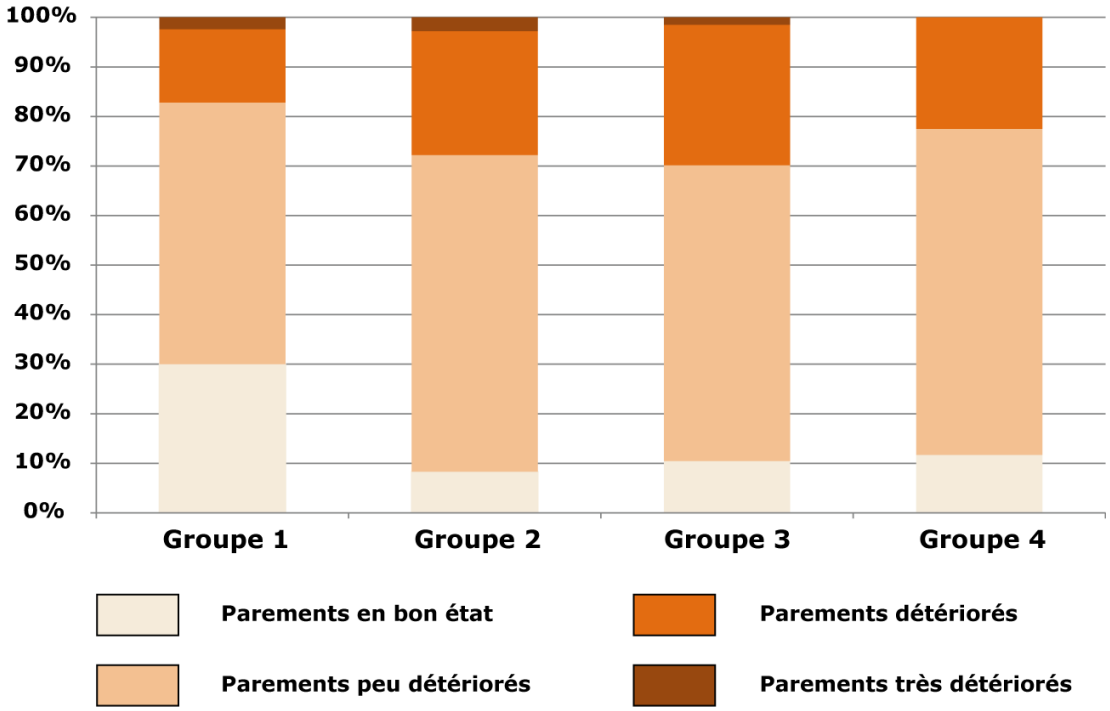


Fig. VIII-13. État de conservation des parements des structures de chaque groupe défini en fonction des trajectoires d'intervention.

En effet, nous sommes face à deux profils très similaires en termes d'état de conservation, dans lesquels la durée d'exposition des structures est pourtant très différente, 22 ans pour le groupe 2, 36 à 40 ans pour le groupe 3. Ce sont donc les interventions pratiquées sur les structures du groupe 2 qui seraient à l'origine d'une

accélération de l'érosion sur certains parements, faisant se rapprocher le profil des édifices inclus dans ce groupe à celui du groupe 3. Dans ce dernier, l'état de conservation a été déterminé bien sûr par le degré d'intervention, mais également par une exposition plus longue aux agents atmosphériques. Les interventions pratiquées sur les édifices du groupe 2 auraient donc constitué un forçage anthropique, car leurs conséquences sur le tempo de l'érosion auraient été similaires à plusieurs dizaines d'années d'exposition aux agents atmosphériques.

En termes de signatures érosives relevées sur les parements des structures (Fig. VIII-14), les profils des quatre groupes définis par la classification des trajectoires d'intervention diffèrent également bien plus que ne le suggéraient les analyses statistiques multivariées.

Groupe	Dissolution (%)	Desquamation (%)	Délitage (%)	Creusement (%)	Nombre
1	52,21	43,78	75,50	14,46	249
2	2,78	63,89	86,11	2,78	36
3	70,15	44,78	55,22	4,48	67
4	54,95	59,46	72,07	0,00	111
Ensemble	51,72	49,35	72,63	8,62	463

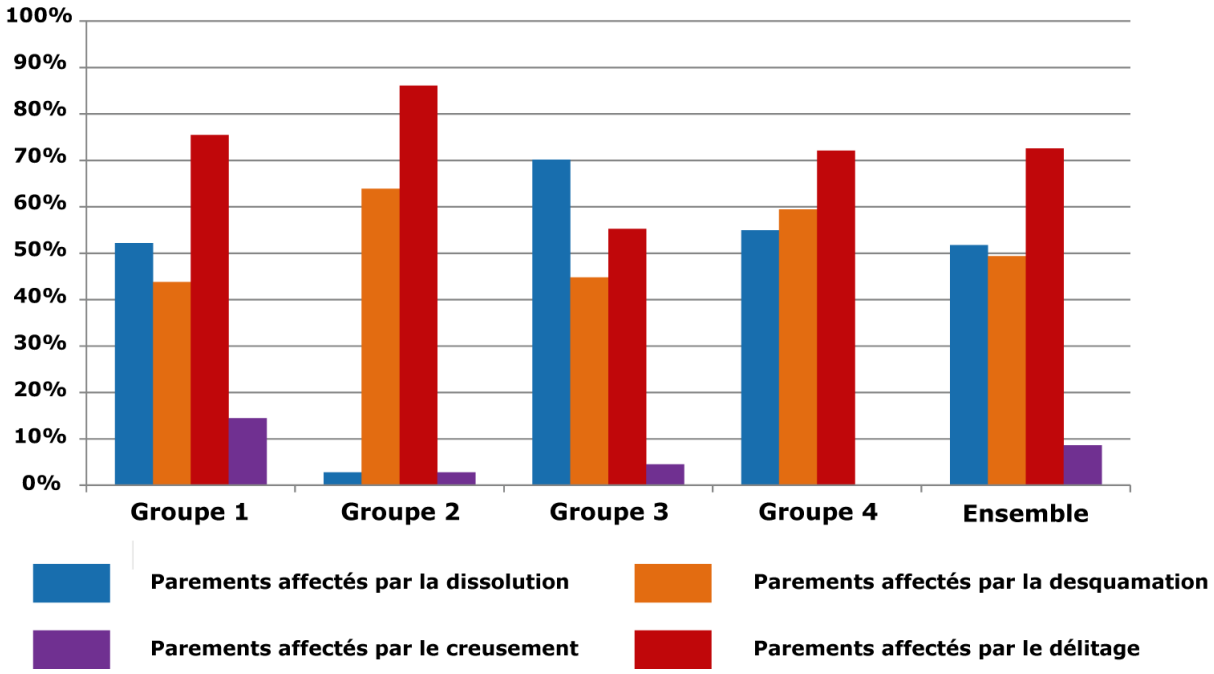


Fig. VIII-14. Signatures érosives relevées sur les parements des structures selon la classification définie lors de l'étape d'anamnèse.

Si l'on étudie les signatures érosives indépendamment, on remarque avant tout une opposition nette de la proportion de parements affectés par la dissolution entre les

groupes 2 et 3. Le groupe 2 se différencie par le fait que les structures qui le composent n'ont connu qu'une seule phase d'intervention, alors que celles qui composent le groupe 3 ont été intervenues ponctuellement sur une durée plus longue (Fig. IV-27, p. 162). On pourrait objecter que la durée d'exposition est susceptible d'entrer en jeu dans ce constat, mais le groupe 4, dont les structures ont été dégagées le plus récemment, présente aussi une proportion importante de signatures érosives relatives à la dissolution. Ce processus chimique serait donc quasiment absent des structures du groupe 2 en raison de la consolidation récente dont elles ont fait l'objet, mais également en raison de leur évolution dans un contexte plus dégagé et exposé à l'air libre que celles du groupe 4. En effet, ces dernières appartiennent au site éponyme Río Bec et sont situées dans un environnement forestier favorable aux processus chimiques, alors que les édifices du groupe 2 appartiennent au site de Xpuhil, plus exposé, où les processus mécaniques sont favorisés.

Plus globalement, les profils obtenus par l'analyse des signatures érosives relevées amènent également à insister sur le rôle mineur de la durée d'exposition des structures et sur la prédominance des interventions humaines sur les modalités de l'érosion des structures étudiées. En effet, si l'on considère la durée d'exposition des structures aux agents atmosphériques, le groupe 4 est celui dont les structures ont été dégagées le plus récemment, puis viennent les groupes 2, 1, et enfin 3, dont les structures ont été dégagées il y a près de 40 ans. Cependant, il n'existe aucune corrélation entre ce gradient et la progression des modalités de détérioration, que ce soit au niveau de l'état de conservation des parements, ou des signatures érosives relevées. Si la durée d'exposition des structures aux agents atmosphériques déterminait la progression de leur détérioration, cette progression serait corrélée au gradient énoncé précédemment. Or, il semble que ce soit les interventions humaines dont les édifices ont fait l'objet qui président à la fluctuation des modalités de leur détérioration. Le fait que les deux groupes les plus homogènes en termes de degré d'intervention des structures, les groupes 1 et 2, soient ceux qui présentent les profils de signatures érosives les plus disparates illustre bien ce constat. En effet, les structures du groupe 1 présentent toutes un degré d'intervention élevé, et les structures du groupe 2 présentent toutes un degré d'intervention limité. Finalement, ce sont ces deux groupes qui s'opposent le plus en termes de trajectoires d'intervention, et ce sont ces mêmes groupes qui se distinguent le plus en termes d'état de conservation et de signatures érosives.

Au total, le retour à une analyse statistique à deux variables nous permet dans un premier temps de souligner la prévalence de l'impact, en termes de détérioration des structures, des interventions humaines sur celui de la durée d'exposition aux agents atmosphériques. Nous sommes donc en mesure de confirmer que les opérations de restauration, consolidation et conservation, constituent un forçage anthropique avéré sur l'érosion du bâti archéologique. Elles sont largement susceptibles de modifier le *modus operandi* de l'érosion des matériaux dans les structures étudiées, et, lorsque leur intensité est élevée, elles sont en mesure d'équivaloir, en termes d'agressivité, à plusieurs dizaines d'années d'exposition aux agents atmosphériques. Dans un deuxième temps, l'interprétation de ces résultats nous amène à critiquer la classification des trajectoires d'intervention des structures établie lors de l'étape d'anamnèse. En effet, cette classification, établie statistiquement par partitions en k-moyennes, est trop largement fondée sur la durée d'exposition des structures alors que c'est le degré d'intervention qui semble présider à leur différenciation. De même, il convient de s'interroger non seulement sur les scores attribués aux différentes interventions, mais également sur la valeur réelle d'une classification des trajectoires d'intervention alors que les interventions ponctuelles et très localisées sont capables d'avoir des effets bien plus significatifs qu'une trajectoire globale, établie sur une multitude de critères.

3.2. Interventions ponctuelles et crises érosives localisées

Les structures archéologiques du secteur Río Bec ont fait l'objet d'interventions humaines variées (Fig. IV-20, p. 153). Les opérations de dégagement ont déterminé la durée d'exposition des structures aux agents atmosphériques, dont le rôle mineur a été souligné précédemment, ou modifié les ambiances climatiques dans lesquels les matériaux évoluent. Les opérations de conservation restent quant à elles assez rares dans le secteur, et les rares occurrences d'application d'enduits sacrificiels paraissent remplir efficacement leur rôle. Parmi les interventions humaines, il convient donc d'accorder une attention particulière aux opérations de consolidation. En effet, les remplacements et réintroductions de pierre, ainsi que les reprises de mortiers ont concerné la quasi-totalité du bâti du secteur, et c'est parmi ces interventions ponctuelles que l'on trouve celles qui ont eu les effets les plus délétères. Nous nous intéresserons dans cette partie aux accélérations de l'érosion provoquées par les rejointoiements au ciment, puis aux variations des régimes d'érosion induits par l'effet d'abri de voûtes partiellement reconstruites.

3.2.1. Rejointoiements au ciment

Bien que la composition des mortiers utilisés n'ait pas été systématiquement mentionnée, on retrouve, à de multiples occasions les traces, sinon les conséquences, des rejointoiements au ciment lors des reconstructions. Ces effets délétères se retrouvent surtout sur le site de Xpuhil, où plusieurs parements qui ont fait l'objet de ces rejointoiements se distinguent par une accélération de l'érosion des matériaux. Les fenêtres photogrammétriques XPU-01 et XPU-07 illustrent ce constat. La figure VIII-15 montre les reliquats de ciment (en gris) incorporés lors de la consolidation de la structure I de Xpuhil en 1992. Le parement ainsi consolidé a fait l'objet d'une quantification de l'érosion par photogrammétrie dont les résultats ont montré un taux de retrait annuel de 0,53 cm par an par rapport à une surface de référence extrapolée à partir du ciment résiduel. Les matériaux constitutifs de cette portion de bâti sont affectés par les processus d'érosion mécaniques de délitage et de creusement et le parement se classe dans la catégorie « très détérioré » en termes d'état de conservation.

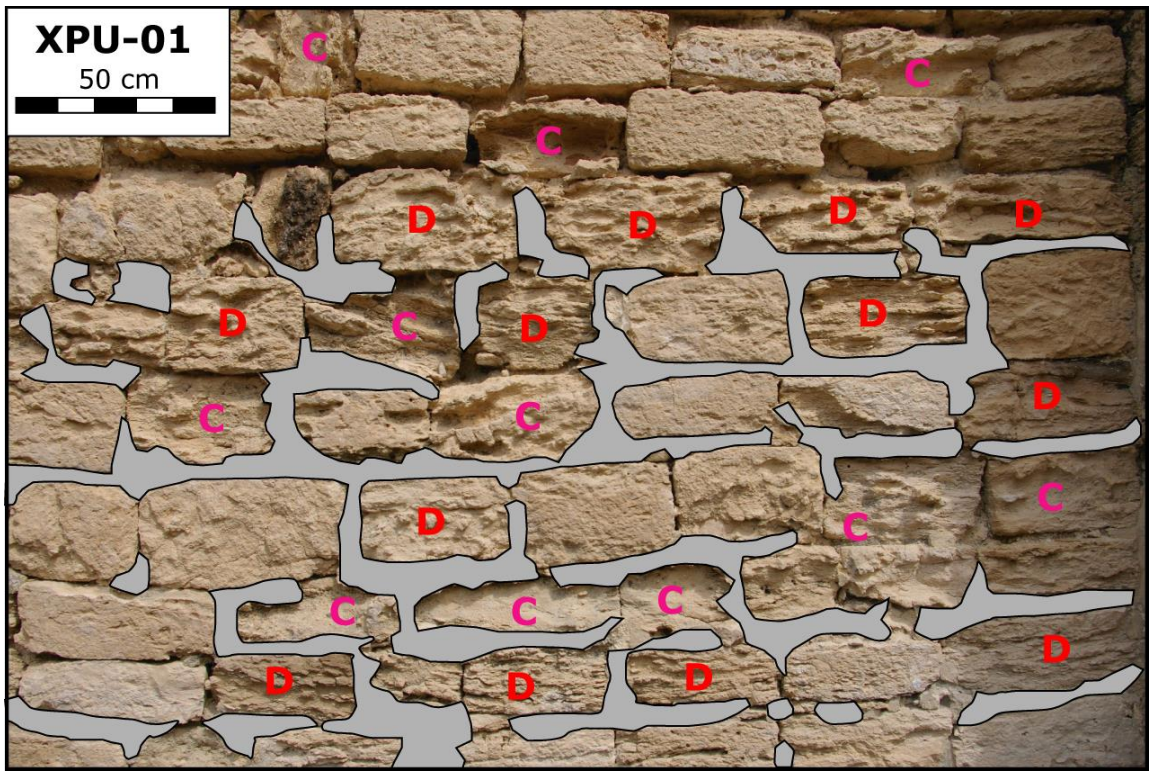


Fig. VIII-15. Parement correspondant à la fenêtre photogrammétrique XPU-01 avec mise en évidence des reliquats de ciment (en gris), des pierres affectées par le délitage (D) et le creusement (C).

La figure VIII-16 montre une autre occurrence d'accélération de la détérioration sur un parement qui a fait l'objet de rejointoiement au ciment, sur la même structure de

Xpuhil. Sur la fenêtre photogrammétrique XPU-07, ouverte sur cette portion de parement, un taux de retrait annuel de 0,52 cm, similaire à celui de XPU-01, a été calculé par photogrammétrie. Ici aussi, le parement est affecté par les processus mécaniques de délitage et de creusement, et il se place également dans la catégorie « très détérioré ».

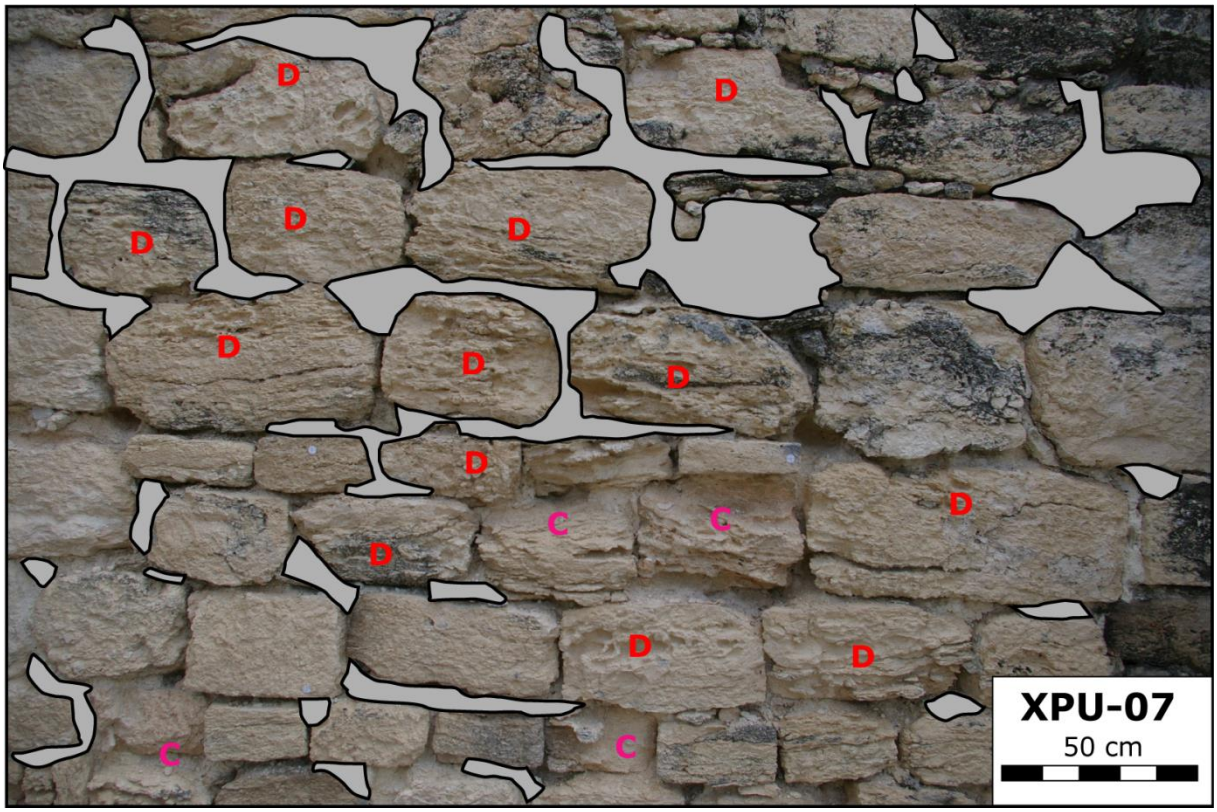


Fig. VIII-16. Parement correspondant à la fenêtre photogrammétrique XPU-01 avec mise en évidence des reliquats de ciment (en gris), des pierres affectées par le délitage (D) et le creusement (C).

On remarque en effet, sur ces deux sections, que les pertes de matière sont extrêmement importantes sur un grand nombre de pierres de taille, bien que d'autres semblent plutôt bien se conserver. Les rapports de restauration du site de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983 ; Bueno et Gutierrez, 1985 ; Bueno *et al.,* 1992) mentionnent l'incorporation de ciment dans les mortiers de restauration, ainsi que des remplacements de pierre. Malheureusement, ces rapports ne stipulent pas avec assez de précision quelles portions de bâti ont fait l'objet de ces interventions, et la quantité exacte de ciment incorporé n'est pas systématiquement précisée. Comme nous l'avons souligné dans l'étape d'anamnèse des structures, les acteurs de la restauration du secteur Río Bec des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix privilégiaient plutôt l'analogie avec les mortiers mayas traditionnels, préférant l'incorporation d'extraits végétaux et de *sascab* à

celle de ciment, bien que ce dernier soit systématiquement utilisé. Dans le cas des fenêtres XPU-01 et XPU-07, le doute est permis quant aux proportions de ciment incorporé au mortier lors des interventions. En effet, sur une grande superficie du parement subsiste une masse grise et compacte qui ne paraît contenir ni chaux, ni extrait végétal. Cette masse de ciment semble avoir, là où elle subsiste mais certainement aussi là où elle s'est elle-même détériorée, provoqué une imperméabilisation des matériaux par un effet « plancher ». Le ciment ne permettrait plus à l'eau et à l'air de circuler, favorisant ainsi la préparation de la pierre par les processus chimiques de dissolution, avant que le relai ne soit pris par les processus mécaniques entraînant les pertes de matière importantes. Le ciment est également source de sels solubles favorisant les processus de desquamation qui entraînent la perte du calcin de surface protecteur et laissent la pierre à nu, et ses grains mobilisables par les processus mécaniques.

La principale limite de l'interprétation réside ici dans le fait que l'on ne connaît pas précisément l'état de conservation des matériaux au moment où le rejointoiement a été pratiqué. En effet, il est possible que les blocs qui restent en bon état de conservation aient été des matériaux remplacés par de nouveaux lors des opérations de restauration, alors que les blocs détériorés aient été des matériaux d'origine simplement réintroduits dans le bâti. De surcroît, le rejointoiement constaté ici ne se retrouve pas sur l'intégralité de la structure. Le ciment a-t-il donc été incorporé car les matériaux étaient plus détériorés qu'ailleurs ? S'agit-il d'une intervention d'urgence réalisée *a posteriori* pour assurer l'intégrité structurelle de l'édifice, sur un parement qui supporte plusieurs sections de murs ? Dans tous les cas, l'intervention de consolidation réalisée ici constitue un véritable forçage anthropique qui modifie les propriétés physico-chimiques des matériaux, et donc leurs interactions avec les paramètres climatiques. La conséquence en est une accélération de l'érosion avec des taux de retrait parmi les plus élevés enregistrés lors de la collecte de donnée.

3.2.2. Effet d'abri des voûtes partiellement reconstruites

Tout au long de ce travail, le mur de la structure V-A de Becán a retenu notre attention en raison de la spatialisation extrêmement nette d'états de conservation distincts sur le même parement, supposant des régimes d'érosion drastiquement différents, commandés par la morphologie du bâti (Fig. VIII-17).

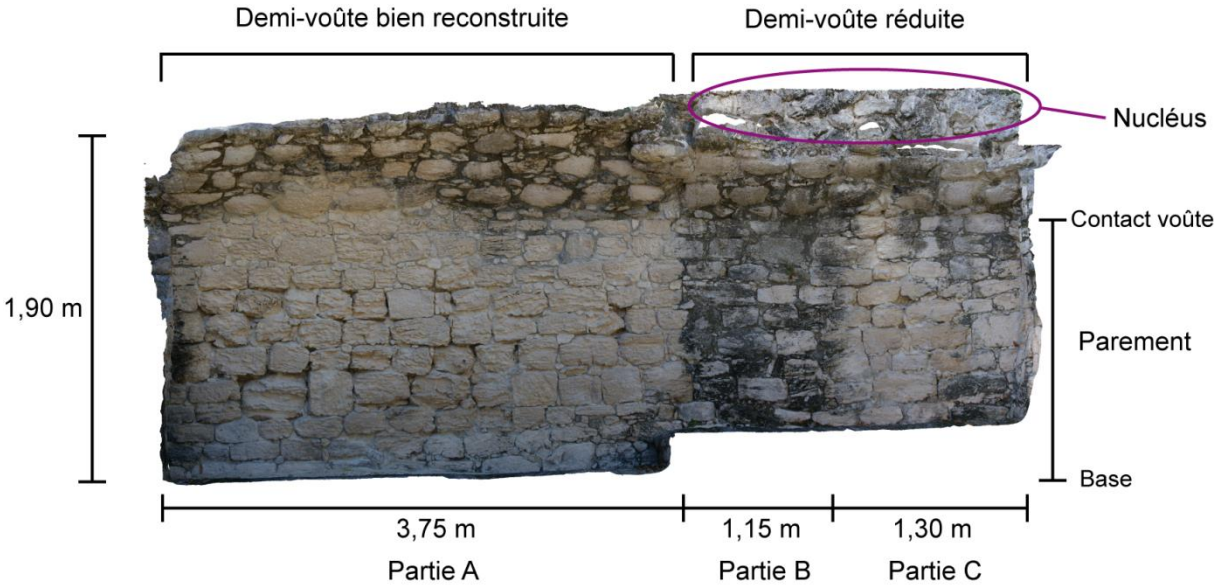


Fig. VIII-17. Présentation du mur de la structure V-A de Becán.

En effet, nous avons attesté (Fig. VI-20, p. 225) et souligné à de multiples reprises l'état de détérioration bien plus avancé sur la partie A, surmontée d'une demi-voûte bien reconstruite, que sur la partie B, surmontée d'une demi-voûte réduite, et colonisée par un biofilm cyanobactérien. A droite du mur, la partie C n'est quant à elle pas recouverte de ce biofilm, tout en étant également surmontée d'une demi-voûte réduite, et présente un état de détérioration intermédiaire. Les résultats de diagnostic de la dynamique érosive (Fig. VI-21, p. 226) ont montré d'une part la prédominance des processus mécaniques de délitage et de creusement sur les partie A et C, présentant des profils assez similaires en termes de signatures érosives. La quantification de l'érosion effectuée par photogrammétrie sur l'ensemble du parement a également montré un retrait maximal de 13,87 cm sur la partie A, 4,15 cm sur la partie B, et 9,57 cm sur la partie C, pour des retraits moyens respectifs de 2 cm, 0,07 cm, et 0,46 cm.

Précédemment dans ce chapitre, nous avons apporté des éléments d'interprétation sur la variation des paramètres climatiques en fonction de la morphologie des structures, et évoqué le cas du mur de la structure V-A de Becán. La partie B, moins abritée par la voûte reconstruite, se distingue par une humidité relative minimale supérieure de 8%, et des températures maximales et minimales enregistrées supérieures de 1°C. Cette section de parement va donc évoluer dans une ambiance plus chaude et plus humide, et permettre aux agents biologiques de croître et de subsister. Plus loin, nous avons également insisté sur le rôle protecteur de la colonisation biologique, et notamment des biofilms cyanobactériens qui agissent comme un couche

protectrice des matériaux et les font évoluer dans une ambiance climatique favorisant davantage les régimes de biodétérioration lente.

Il semblerait de surcroît que la reconstruction de la voûte lors de la consolidation soit à l'origine de cette disparité de colonisation par le biofilm cyanobactérien. En effet, l'effet d'abri induit par la voûte reconstruite commande les paramètres climatiques permettant la croissance et la subsistance des organismes, qui commandent eux-mêmes les ambiances microclimatiques responsables de régimes d'érosion différenciés. L'intervention humaine que constitue la reconstruction de la voûte, même partielle, peut être considérée comme un forçage anthropique, dans le sens où elle modifie les facteurs extrinsèques de l'érosion des matériaux par l'intermédiaire des agents biologiques. On pourrait objecter que la partie C n'est également pas surmontée d'une demi-voûte et qu'elle ne présente pas un état de détérioration aussi avancé. En effet, cette partie est moins détériorée que la partie B car elle n'est pas recouverte du biofilm protecteur. L'effet d'abri, en revanche, s'il est moins marqué par la reconstruction de la voûte, est toutefois présent dans une moindre mesure par la présence du mur adjacent, sur le côté nord de la salle, et par des pierres de maçonnerie incorporée au nucléus en aplomb du parement, ce qui est complètement inexistant sur la partie B.

Par ailleurs, cet effet d'abri induit par les modalités de reconstruction des voûtes se retrouve sur le site éponyme de Río Bec à de nombreux endroits où la voûte n'a pas été entièrement reconstruite lors des consolidations (Fig. VIII-18). Sur ces 16 emplacements où un parement est, du même tenant, à un endroit abrité par une voûte en surplomb, à un autre totalement exposé et sans effet d'abri, on retrouve à 11 reprises la même spatialisation des modalités d'érosion que sur le mur de la structure V-A de Becán. A chaque fois, les parements sont recouverts d'un biofilm cyanobactérien et présentent une accélération de la détérioration là où la roche n'est pas protégée par ces recouvrements biologiques. Les effets microtopographiques identifiés ici nous amènent à réfléchir sur l'impact des interventions humaines en tant qu'élément favorisant la colonisation des matériaux par des agents biologiques modifiant les régimes d'érosion. Ces interventions, en l'occurrence la reconstruction d'une voûte, sont donc susceptibles d'avoir un effet délétère de manière indirecte.

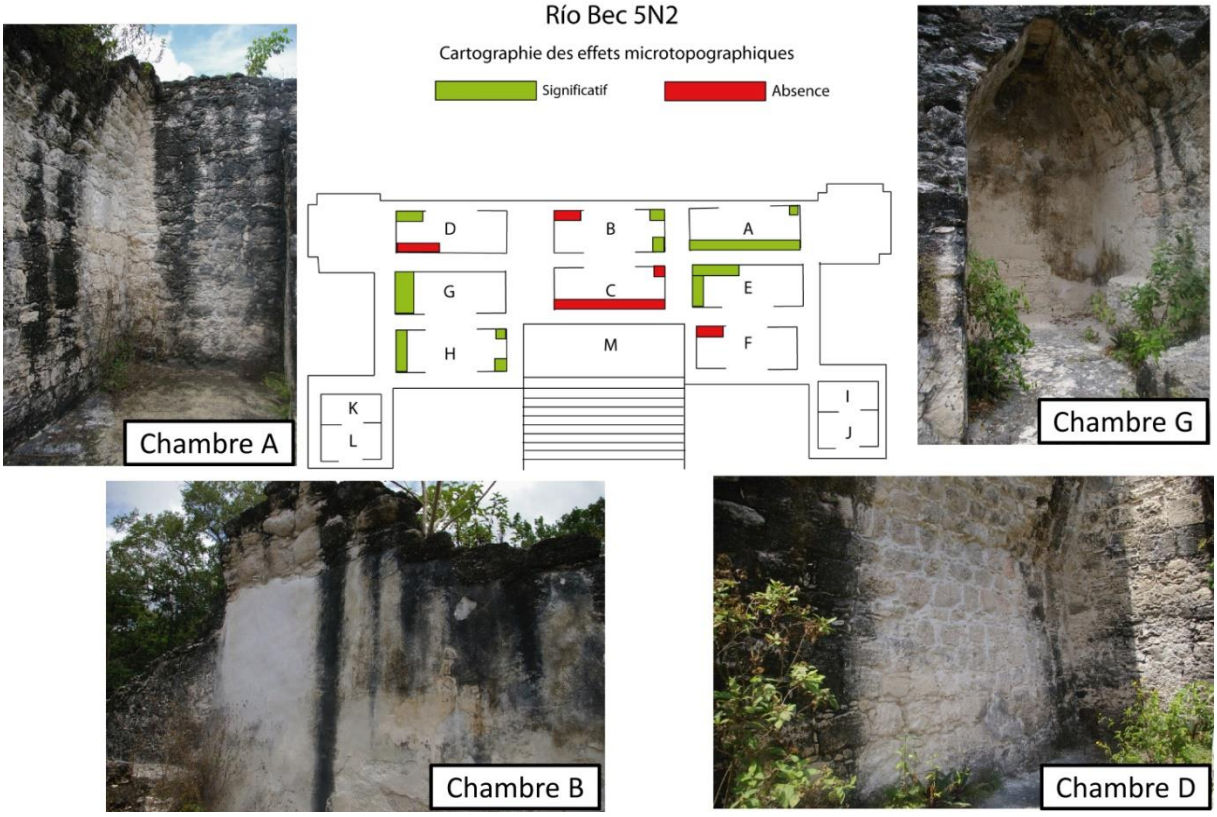


Fig. VIII-18. Cartographie des effets microtopographiques identifiés sur le site éponyme de Río Bec. En vert, les modalités de reconstruction de la voûte induisent une spatialité des régimes d'érosion. En rouge, ces modalités ne semblent pas avoir d'effet.

Au total, l'impact des interventions humaines s'est avéré difficile à évaluer pour des raisons méthodologiques sur lesquelles nous reviendrons plus loin. En revanche, nous avons tout de même pu montrer, à travers la critique de la classification des structures établie en anamnèse, que les opérations de restauration ont un impact bien supérieur sur l'érosion des matériaux que leur simple exposition aux agents atmosphériques. Les interventions humaines constituent donc bien un réel forçage anthropique qui doit être pris en compte dans l'approche systémique de la détérioration de la pierre monumentale. Nous avons également insisté sur les effets délétères de l'incorporation de ciment dans les mortiers de restauration, mais également sur les effets d'abri pouvant être induits par différentes stratégies de reconstruction, impliquant indirectement des régimes d'érosion contrastées en favorisant une colonisation biologique dont le rôle protecteur apparaît de plus en plus clair.

Conclusion du chapitre VIII

Au cours de ce chapitre, nous avons cherché à interpréter la somme des résultats produits à travers des axes de réflexion transversaux, afin de ne pas répéter les quatre étapes qui ont constitué autant de chapitres dans la partie 2, au cours de laquelle nous avons essentiellement présenté les résultats. Ces axes transversaux nous ont permis de faire le bilan des apports du présent travail en termes d'évaluation de la durabilité des matériaux au regard des facteurs de contrôle, de détermination d'un *modus operandi* de leur érosion dans le secteur Río Bec, et enfin d'appréciation de l'impact des interventions humaines à plusieurs échelles.

En somme, la durabilité des calcaires monumentaux du secteur Río Bec dépend d'une part de la variabilité des faciès au sein des matériaux, entre le faciès *caliche* plus vulnérable, et le faciès laguno-continental dolomitique plus résistant. D'autre part, c'est l'équilibre entre la progression de l'érosion différentielle par dissolution de la micrite et la progression de la recristallisation secondaire qui détermine le tempo de la détérioration des matériaux étudiés. A l'échelle du secteur, ces matériaux évoluent dans des ambiances climatiques contrastées, dans lesquelles l'environnement forestier, l'exposition des structures ainsi que leur morphologie, jouent un rôle essentiel dans l'agressivité des agents atmosphériques.

Les facteurs de contrôle de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec interagissent en fonction d'équilibres complexes et selon des relais de processus chimiques puis mécaniques qui ont chacun leur rôle dans la préparation ou la détérioration de la roche. Au sein de ces équilibres, il convient de souligner le rôle fondamental des recouvrements biologiques, dont la présence est extensive dans le secteur et qui sont susceptibles de modifier drastiquement les modalités de l'érosion par leur effet modérateur sur les paramètres climatiques.

Enfin, les interventions humaines constituent un réel forçage anthropique sur la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Nous avons montré qu'elles ont un impact bien plus important que celui de la simple exposition des matériaux aux agents climatiques, mais également qu'elles peuvent être à l'origine de véritables crises érosives localisées.

Chapitre IX

Discussion

> *« Toute recherche est une enquête. […] La science est une leçon de temps, un temps qui s'efface ou bien que nous résumons par grandes stratifications millénaires. »*
>
> Théodore MONOD, *Le chercheur d'absolu,* 1997.

Au cours de notre travail, nous avons cherché à identifier, caractériser et évaluer l'impact des interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Cet objectif, construit par notre problématique et articulé autour de quatre étapes de travail (l'anamnèse des structures étudiées, la caractérisation des facteurs de contrôle, le diagnostic de la dynamique érosive, et la quantification de l'érosion) a été suivi en adoptant une approche de géomorphologue. Si cette dernière s'inscrit dans la continuité de travaux antérieurs menés depuis les années quatre-vingt-dix, nous avons également tenté, dans divers domaines et avec plus ou moins de succès, d'innover et d'enrichir cette approche par des tentatives d'approfondissement méthodologique et scientifique, en empruntant çà et là aux autres disciplines impliquées dans notre thématique de recherche.

Dans cet ultime chapitre, nous tenterons donc de souligner les apports de ce travail et en quoi ils font écho aux recherches menées sur les mêmes problématiques, l'originalité des tentatives d'approfondissement de l'approche et en quoi elles sont susceptibles d'être critiquées ou valorisées, avant d'évoquer des perspectives d'amélioration et de futurs développements. En premier lieu, il conviendra de faire un point sur la démarche d'anamnèse, qui a constitué une étape préliminaire importante et mérite un retour sur expérience, tant méthodologique que scientifique. Nous tenterons ensuite de valoriser les apports du présent travail quant à la définition du *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, tout en soulignant les limites de l'interprétation proposée. Enfin, nous proposerons une réflexion plus approfondie sur l'impact des interventions humaines, qui reste le questionnement

central de notre travail, son identification et son évaluation dans une approche géomorphologique intégrée de la détérioration de la pierre monumentale.

1. Anamnèse des structures : retour sur expérience

L'anamnèse des structures constitue la première étape, essentielle et préliminaire, de l'étude de l'érosion de la pierre monumentale. Fondée sur l'analogie avec la médecine, elle consiste à reconstituer l'histoire clinique d'un patient, et dans le cas présent la chronologie des interventions pratiquées sur le monument étudié. L'importance de cette approche a été soulignée par Smith et Prikryl (2007), qui insistent sur la « mémoire » des pierres : les matériaux de construction porteraient en eux l'histoire des stress qu'ils ont subis, tant environnementaux qu'anthropiques, et les processus de détérioration pourraient être comparés à des afflictions cancéreuses telles que les tumeurs, nodules et métastases. Mais si la valeur de cette approche par analogie avec la médecine est largement justifiée, exemples à l'appui, chez ces auteurs, ils ne donnent aucune indication concrète sur la méthode à adopter pour réaliser cette étape d'anamnèse. Fitzner (2004) va plus loin en indiquant quelles sources documentaires peuvent être utilisées dans le cadre de l'anamnèse des structures étudiées (Fig. IX-1).

	Items of documentation	
Anamnesis	Archive work – compilation and evaluation of available documents	Drawings, plans, maps, photographs or other relevant illustrations
		Publications, reports, journals, newspapers, expertises, files, building logs, records, construction manuals, manufacturing manuals, supplier´s documents, accounts, static calculations etc.
	Collection and evaluation of oral information from people professionally involved with the object and from local people	
	Collection and evaluation of environmental data from authorities or institutions	
	Documentation of own observations, elaboration of new documents where necessary	

Fig. IX-1. Sources utilisables dans le cadre de la démarche d'anamnèse (Fitzner, 2004).

Pour Fitzner, l'anamnèse consiste à compiler et à évaluer toutes les informations qui rentrent dans le cadre de cette démarche, mais le résultat de cette étape semble davantage se traduire par une connaissance approfondie de l'histoire du bâti et de ses aspects architectoniques que par l'acquisition d'un contrôle chronologique des interventions ayant concerné la structure en question. Au final, aucune étude menée sur l'érosion de la pierre monumentale comportant une étape d'anamnèse ne propose de méthode clairement définie pour réaliser cette dernière.

1.1. La classification des trajectoires d'intervention des structures : une tentative à améliorer

Dans notre travail, nous avons avant tout choisi de reconstituer la temporalité des interventions humaines sur les structures étudiées en allant chercher leurs dates de redécouverte, de dégagement, de consolidation, de restauration. Nous avons également prêté attention aux types d'interventions et en avons proposé une catégorisation en fonction de leurs objectifs (Fig. IV-20, p. 153). Surtout, nous avons cherché à définir des trajectoires d'interventions sur la base de l'effort d'anamnèse, afin que ce dernier ait une traduction qualitative et quantitative, permettant de classer les structures étudiées. Cette tentative découle du questionnement présenté dans l'introduction générale de ce manuscrit et exprimé dans un « arbre des possibles » qui recenserait toutes les évolutions possibles d'une structure archéologique après sa redécouverte (Fig. 5, p. 19). Pour que ce questionnement prenne sens, il a donc fallu, en l'absence de méthodologie clairement définie dans la littérature, trouver une façon de définir ces trajectoires d'intervention en fonction des informations acquises lors de l'anamnèse des structures étudiées. Nous avons choisi pour cela de tenir compte de deux variables : le degré d'intervention et la durée d'exposition post-dégagement.

Le degré d'intervention des structures a été calculé en distinguant les opérations à deux niveaux. D'abord ont été distinguées les opérations de dégagement seul de celles de dégagement accompagné de consolidation. Ensuite, nous avons fait le choix de distinguer également les dégagements partiels et complets, et les consolidations extensives et ponctuelles (Fig. IV-27, p. 162). Des points ont été attribués à chacune de ces interventions (3 pour les dégagements complets et consolidations extensives, 1 pour les dégagements partiels et consolidations ponctuelles). Au final, la construction de cette variable se heurte à plusieurs limites. D'abord sur la distinction des opérations : les

dégagements sans consolidation consécutive sont quasiment inexistants, ce qui ne justifie pas cette distinction. Ensuite, à partir de quel moment une intervention peut-elle être qualifiée de « ponctuelle » ou « extensive » ? Nous avons ici cherché à adapter cette distinction à la pluralité des opérations recensées lors de l'anamnèse, et choisi de qualifier une intervention de ponctuelle lorsqu'elle ne concerne qu'une seule chambre des édifices du Río Bec, et d'extensive lorsqu'elle concerne au moins un quart du volume global de la structure. Néanmoins, il a été difficile de trouver un juge de paix à cette question, et les portions de bâti concernées restent complexes à estimer. Par ailleurs, la temporalité des opérations est susceptible d'être occultée par ce système d'attribution de points : une structure ayant connu un dégagement accompagné d'une consolidation en 1970 et non intervenue depuis se verra attribuer trois points, soit autant qu'une structure consolidée ponctuellement en 1970, puis en 1985, puis en 2000, alors que leur trajectoire d'intervention est radicalement différente. La deuxième variable entrant en jeu dans la classification des trajectoires d'intervention des structures est la durée d'exposition des structures. Celle-ci est plus robuste, dans le sens où elle est purement quantitative et moins « experte » ou « arbitraire » ; elle se résume en effet à des années d'exposition des structures aux agents atmosphériques après leur dégagement. Toutefois, une limite subsiste quant à l'effet des interventions sur l'environnement immédiat des vestiges. En effet, si un dégagement du monticule de terre est systématiquement accompagné d'un déboisement pour des raisons logistiques, des « nettoyages » de végétation sont souvent mentionnés dans les rapports de restauration, généralement sans que l'on en sache l'étendue ou les méthodes précises alors même que ces opérations sont susceptibles de modifier les ambiances climatiques dans lesquelles s'inscrivent les monuments.

Au total, la classification d'une dizaine de structures d'une même zone archéologique selon leur trajectoire d'intervention est une tentative inédite. Elle est motivée par la volonté de concrétiser le travail d'anamnèse, dont l'importance est souvent soulignée mais dont la mise en pratique se résume généralement à une accumulation de données, et de construire à partir de ce travail un cadre d'analyse pouvant fournir constituer une grille de lecture. Cette tentative doit néanmoins être améliorée, et des solutions doivent être apportées à la construction des deux variables entrant en jeu dans la définition des trajectoires d'intervention. Le degré d'intervention doit être quantifié de manière plus robuste, en tenant compte de l'extension des opérations dans l'espace et dans le temps, et la durée d'exposition doit inclure et

distinguer le dégagement du monticule des nettoyages de végétation. Malgré tout, si notre tentative de classification est critiquable sur ces points, on retiendra finalement que la partition statistique en k-moyennes a donné une répartition plutôt cohérente dans les groupes de structures, avec des édifices qui ont globalement connu des interventions similaires selon des chronologies comparables. De même, nous avons pu, en utilisant le cadre d'analyse ainsi construit et en le confrontant aux résultats du diagnostic de la dynamique érosive, déterminer que ce sont les interventions humaines dont les édifices ont fait l'objet qui président à la fluctuation des modalités de leur détérioration. Enfin, les rapports de restauration peuvent également poser problème lorsqu'ils sont rédigés par différents auteurs, appartenant à des disciplines variées, ayant chacun leur point de vue, leur méthodologie et leur structure de rédaction. En somme, l'exhaustivité et la précision des rapports, tant en termes de détails sur les interventions qu'en termes de couverture photographique les illustrant, sont des éléments-clé de l'étape d'anamnèse et sont garantes de son succès.

1.2. Synthèse et cartographie des interventions : vers un outil de gestion du patrimoine ?

Au cours de l'étape d'anamnèse des structures étudiées, nous avons fait l'effort de synthétiser et de cartographier des interventions recensées sur la base des rapports de restauration. Parmi ceux qu'il nous a été donné d'étudier, la grande majorité (en dehors des rapports du projet Río Bec mené dans les années deux-mille par les archéologues du laboratoire « Archéologies des Amériques ») ont été tapés à la machine à écrire, et ne sont pas numérisés. Ce sont donc des documents peu pérennes, dont la lecture s'avère difficile trente années après leur impression (papier jauni, encre effacée, reliure précaire), dont les photographies sont peu exploitables, et majoritairement très « gris », avec beaucoup d'informations rédigées et listées de manière plus ou moins précise. Leur étude a été longue et l'extraction d'information a nécessité des efforts de compréhension et de concentration. Au final, les informations recueillies ont été synthétisées en deux temps. D'abord un tableau a été réalisé pour chaque site, listant les interventions par structure puis par portion (façades extérieures, chambres intérieures) et indiquant pour chacune d'elles le type d'opération et la source du rapport dans lequel elle est mentionnée. Ensuite, les informations contenues dans ces tableaux ont été reportées sur des croquis successifs cartographiant l'emplacement et l'extension spatiale des

interventions (voir la section 3.2. du chapitre IV, les tableaux IV-1 à IV-3 et les figures IV-21 à IV-26, pp. 155 à 161).

Cette méthode a surtout permis de disposer des dates de dégagement des structures afin de connaître leur durée d'exposition aux agents atmosphériques, et ainsi pouvoir calculer des taux de retrait annuel sur les fenêtres photogrammétriques de quantification de l'érosion. Elle a également permis d'avoir un aperçu visuel de la chronologie des interventions, plus percutant qu'un rapport écrit avec des informations plus faciles à extraire. C'est ici l'approche adoptée, issue avant tout de la géographie et en partie fondée sur un souci de spatialisation, qui est à valoriser. En effet, un travail d'anamnèse, que ce soit sur un secteur archéologique comme c'est ici le cas, ou sur une portion de structure plus réduite, peut aboutir à un outil de gestion précieux pour les acteurs de conservation. Cet outil permet de disposer des informations nécessaires à la construction des stratégies de conservation : dates et types d'interventions réalisées sur l'édifice, noms des responsables des chantiers de restauration, source et disponibilité des rapports. Dans l'idéal, toutes ces informations devraient être intégrées à un SIG (Système d'Information Géographique), et être accompagnées d'une couverture photographique la plus complète possible (Fig. IX-2).

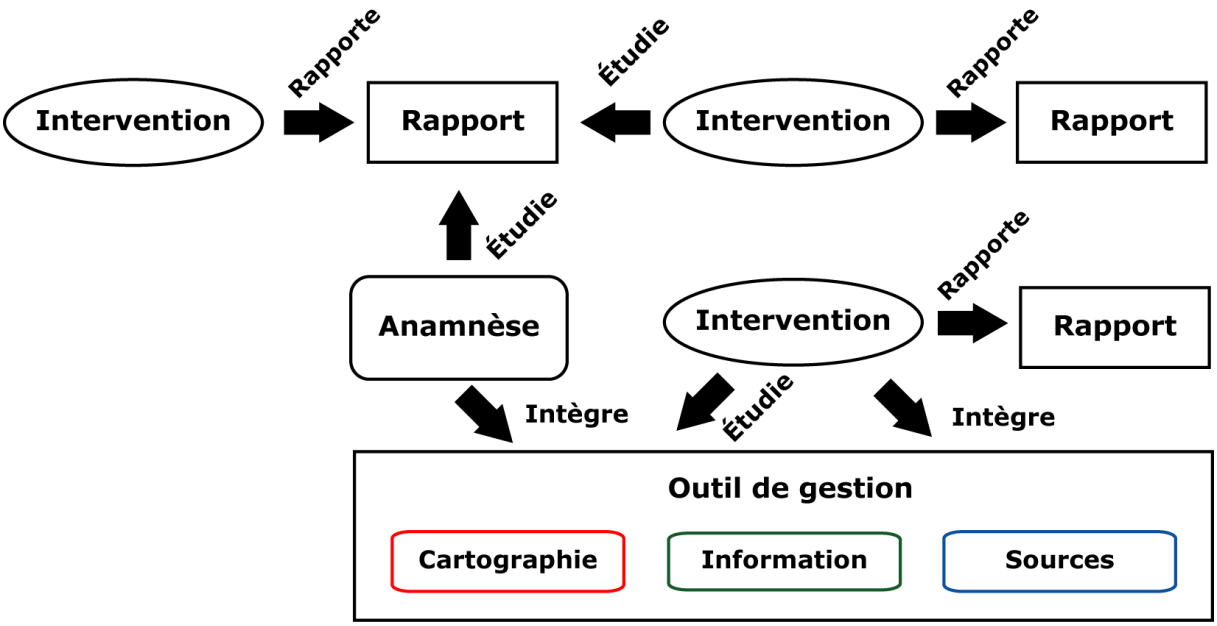


Fig. IX-2. Fonctionnement de l'outil de gestion issu de la démarche d'anamnèse.

Dans un fonctionnement « classique », un monument fait l'objet d'une intervention, puis les informations concernant cette intervention sont consignées dans

un rapport. Ce rapport est ensuite étudié lorsqu'une nouvelle intervention est nécessaire, l'intervention est pratiquée et les informations la concernant rapportées dans un nouveau rapport. Ce fonctionnement entraîne une multiplication des rapports lorsque les monuments sont intervenus de nombreuses fois, avec le risque que les documents créés soient perdus ou détériorés, et que leur disponibilité soit variable en fonction des institutions les conservant. Lorsque la démarche d'anamnèse entre en jeu, elle synthétise l'ensemble des rapports concernant un site archéologique et intègre les informations recueillies dans un outil de gestion infographique. Cet outil doit ensuite être rendu directement consultable par les acteurs de la conservation qui pourront avoir un accès rapide et plus aisé à toutes les informations nécessaires à l'élaboration de leur stratégie de conservation. Une fois les interventions ultérieures réalisées, les informations les concernant sont intégrées dans l'outil de gestion qui compile ainsi toutes les informations des interventions successives dont le monument a fait l'objet, construit en trois volets. Le volet « cartographie », qui est à la base de l'outil de gestion et se résume par une référentiel spatial infographique du monument dans toutes ses dimensions : une cartographie « vue du dessus » comme nous l'avons réalisée ici avec les croquis successifs, mais aussi une représentation graphique des différentes façades et portions de bâti pouvant être réalisée par photogrammétrie. Le volet « information », qui consiste à intégrer au sein du référentiel spatial infographique les dates, types et acteurs de l'intervention sur les portions de bâti concernées. Enfin, le volet « sources », qui intègre les différentes références bibliographiques justifiant l'intervention, ainsi que la référence du rapport et sa disponibilité. En effet, un tel outil de gestion n'a pas vocation à se substituer aux rapports de restauration, qui doivent continuer à exister, mais plutôt à faire leur synthèse et à rendre l'information plus facilement accessible.

Au total, l'étape d'anamnèse a constitué une démarche enrichissante, dans laquelle nous avons pu bâtir une méthodologie en l'absence d'indications sur la façon de réaliser ce travail dans la littérature soulignant son importance. Si notre tentative de classification des structures selon leur trajectoire d'intervention doit largement être améliorée, la proposition d'un outil de gestion à destination des acteurs de la conservation des monuments historiques justifie cette démarche d'anamnèse et lui donne du sens. En effet, le contexte de changement global se caractérise par un interventionnisme croissant sur le patrimoine bâti, et l'information commencera vite à être difficile à consigner. Pourtant, l'information est cruciale, tant par sa qualité que par sa qualité. Nous avons, au cours de notre travail, été limité par la disponibilité des

rapports d'interventions, mais aussi parfois par leur manque de précision, notamment à l'échelle des parements où nous avions besoin d'une précision plus fine que « la façade nord » ou « les chambres intérieures » (*sic*) sur les portions de bâti concernées. La démarche d'anamnèse peut rapidement devenir trop complexe à mettre en œuvre lorsqu'elle concerne un secteur archéologique de plusieurs sites avec plusieurs structures, comme c'est le cas ici. En revanche, elle prend tout son sens lorsqu'elle concerne une portion de bâti réduite. Il est alors possible d'approfondir les recherches bibliographiques et iconographiques afin de préciser l'échelle des interventions, mais aussi de disposer de photographies anciennes à des fins de comparaison diachronique comme cela a pu être fait sur les *Judges Lodgings* à Oxford (Inkpen *et al.,* 2001), sur le temple de Ta Keo au Cambodge par André *et al.* (2008), mais également lors d'une mission exploratoire préalable à ce travail de doctorat, menée sur le secteur Puuc, dans le nord-est de la péninsule du Yucatán, plus connu, mais aussi plus intervenu et mieux documenté que le secteur Río Bec (Genet, 2012).

Enfin, il apparaît également qu'il serait plus judicieux d'effectuer la démarche d'anamnèse après les autres étapes de travail, notamment celles de diagnostic de la dynamique érosive et de quantification de l'érosion. Nous prenons ici le contrepied de Smith et Prikryl (2007) et de Fitzner (2004), pour qui l'étape d'anamnèse est un prérequis au diagnostic et donc une étape préalable. Pourtant, est-il judicieux de ne travailler que sur les portions de bâti ayant été intervenues ? Ne serions-nous pas alors tentés de ne travailler que sur les interventions ayant eu des effets délétères ? Ne vaudrait-il mieux pas d'abord localiser les portions de bâti sujettes à une accélération de l'érosion, quantifier cette accélération, puis en déterminer la cause, qu'elle soit due à une intervention humaine néfaste ou à tout autre facteur ? Il s'agirait ici de limiter les raisonnements circulaires dans lesquels il peut être facile de tomber : réaliser l'anamnèse d'une structure et pointer les portions de bâti intervenues, caractériser et quantifier l'érosion consécutive, pour enfin établir une causalité entre l'intervention et une accélération de la détérioration. Pourtant, d'autres portions de bâti ont été intervenues et ces interventions n'ont pas eu d'effets délétères, et d'autres endroits présentent un décuplement des vitesses de retrait des matériaux sans que celui-ci puisse être imputable à une intervention humaine. Dans tous les cas, si la position de l'étape d'anamnèse dans la chronologie de l'approche géomorphologique de la détérioration de la pierre monumentale est susceptible d'être questionnée, la nécessité de l'entreprendre à un moment ou à un autre ne souffre aucune contestation.

2. Légitimité du *modus operandi* proposé : entre limites méthodologiques et expertise géomorphologique

Le *modus operandi* qui a été proposé dans le chapitre VIII (Fig. VIII-9, p. 280) est fondé sur l'interprétation croisée des résultats de la caractérisation des facteurs de contrôle et du diagnostic de la dynamique érosive. Dans l'objectif d'identifier et de caractériser le forçage anthropique constitué par les interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, la proposition de ce *modus operandi* consiste avant tout à essayer de déterminer les modalités générales de leur détérioration. En disposant de ces modalités et des résultats de l'anamnèse des structures, le croisement de ces deux grilles de lecture devait permettre d'identifier les portions de bâti sur lesquelles les interventions humaines ont provoqué une accélération de l'érosion.

Si cette proposition s'est largement inspirée des représentations schématiques des effets de la pollution sur les matériaux en grès de Smith *et al.* (2010), de cristallisation des sels modifiée par Rothert *et al.* (2007) d'après les travaux de Fitzner *et al.* (1997), et des modèles conceptuels d'érosion des calcaires monumentaux de Smith et Viles (2006), cette démarche est également fondée sur une méthodologie originale. En effet, le diagnostic de la dynamique érosive, en l'absence de méthode précise pour le réaliser à l'échelle d'un secteur archéologique, a été effectué en relevant plusieurs variables qualitatives sur chaque parement de toutes les chambres constitutives des structures étudiées. Il a été choisi de procéder ainsi pour déterminer les modalités de l'érosion des calcaires monumentaux sur le corpus d'édifices étudié, grâce notamment à l'évaluation de l'état de conservation des parements. Si cette étape de travail comporte certaines limites méthodologiques déjà identifiées dans la littérature, et sur lesquelles il est important de revenir, elle est également justifiée par les résultats des autres étapes de travail et par une expertise géomorphologique fondée sur la connaissance des formes et signatures érosives, ainsi que des processus associés.

2.1. Pierre « palimpseste » et non-linéarité des taux d'érosion

La principale limite qui s'impose à nous lors de la proposition d'un *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec est la non-linéarité des taux de détérioration. En effet, André et Phalip (2010) rappellent à la suite de Pope

et al. (2002) que si la majorité des travaux menés sur ces problématiques proposent des taux de météorisation linéaires, l'efficacité des processus érosifs est le plus souvent épisodique, voire obéissant à des systèmes complexes marqués par des pulsations erratiques, discontinues, ou même chaotiques (Viles, 2005). Les vitesses d'érosion sont ainsi tributaires de franchissement de seuils définis par les interactions des facteurs intrinsèques et extrinsèques, que nous avons tenté de caractériser finement. En revanche, ces interactions sont largement susceptibles de favoriser une action conjointe des processus sur l'épiderme rocheux, ce dernier étant successivement attaqué par des phénomènes de différentes origines. Ces processus laissent des signatures, mais ces signatures, notamment lorsqu'elles entraînent des pertes de matière importantes, peuvent également se superposer et masquer les traces des autres processus. La pierre est donc un palimpseste, dans le sens où les processus de détérioration y écrivent et y effacent successivement leurs traces.

Comment, à ce moment-là, être sûr que les signatures observables témoignent de l'efficacité d'un processus en particulier ? Par exemple, lorsque nous avons observé la signature du processus de délitage (une désagrégation linéaire suivant les lignes de faiblesse de la roche) sur un calcaire, sans avoir observé celle du processus de dissolution (vaguelettes et cupules de dissolution), cela signifie que le délitage est actif et efficace, mais pas que la dissolution n'entre pas en jeu. En effet, la signature érosive du délitage, entraînant des pertes de matière importantes et rapides, ne laisse pas le temps à l'épiderme rocheux d'imprimer la marque du processus de dissolution, dont la signature est davantage superficielle. Dans son travail sur le possible caractère « chaotique » des phénomènes de météorisation, Viles (2005) rappelle que les associations synergiques (action conjointe allant dans le même sens d'une accélération de l'érosion) ou antagonistes (action conjointe mais contraire, diminuant l'érosion) des processus érosifs et leur utilisation prospective pour évaluer la détérioration future représente une des principales lacunes dans les connaissances accumulées sur la thématique. Force est de constater que nous n'avons pas pu combler cette lacune, et que cette limite pose un problème de taille, qui ne pourra être résolu qu'en instaurant un suivi rigoureux des monuments étudiés, couplé à une couverture photographique (voire une modélisation en trois dimensions) systématique, ce qui renvoie à la justification de l'outil de gestion précédemment proposé.

Par ailleurs, l'évaluation de l'état de conservation des parements, qui a permis l'identification d'une corrélation avec les signatures des processus érosifs, a longtemps posé question. En effet, les modalités cette variable « experte », fondée sur les pertes de matière évaluées visuellement à l'échelle du parement et exprimée par une échelle comportant quatre niveaux, se sont rapidement retrouvées corrélées positivement aux modalités de la variable concernant les signatures érosives. Cette variable « état de conservation » a donc été intégrée dans l'analyse des correspondances multiples en tant que variable illustrative, pour que les scores obtenus par les modalités de cette variable ne contribuent pas à la construction de l'espace factoriel, ce qui réduit les risques de surinterprétation de la covariance. Le raisonnement circulaire n'est pourtant pas loin, car les processus érosifs identifiés se distinguent par l'importance des pertes de matière qu'ils entraînent, ce qui les rend obligatoirement corrélés à un état de conservation évalué par rapport à ces mêmes pertes de matière. Cela étant dit, comment améliorer la méthodologie de collecte de données pour obtenir une variable moins « experte » ? L'idée de bâtir une variable quantitative à partir d'un modèle numérique de parement sur lequel aurait été calculé un rapport entre les données des trois dimensions a été évoquée. Cela aurait produit une classification standardisée de plusieurs catégories, et une variable quantifiée, plus robuste. Malgré cela, il aurait fallu pouvoir ensuite modéliser chaque parement pour le confronter à cette classification standardisée (nous en avons étudié plus de 400), ce qui aurait été beaucoup trop chronophage : nous serions rapidement revenus à une évaluation visuelle. Et puis surtout, cette solution ne résout pas le problème puisqu'elle implique, ici aussi, les pertes de matière par le rapport entre largeur, longueur et profondeur du modèle, avec pour résultat un volume érodé dont la covariance avec les signatures érosives serait toujours source de surinterprétation.

Enfin, il convient de rappeler que d'autres limites à l'approche géomorphologique de l'érosion de la pierre monumentale identifiées dans la littérature s'appliquent également, dans une moindre mesure, à notre travail. Viles (2005) souligne l'effet « mémoire » des matériaux de construction, qui sont susceptibles d'accumuler et de stocker les agents érosifs, tels que les polluants et sels solubles, induisant une possible hystérésis (persistance d'un phénomène bien qu'ait cessé la cause qui le produit) des dynamiques érosives. De même, Pope *et al.* (2002) restent conscient que l'érosion de la pierre monumentale obéit à des règles différentes de l'érosion des roches en milieu « naturel ». En effet, les matériaux de construction se caractérisent par une extraction récente qui leur confère une certaine « fraîcheur », par une préparation (taille de la

pierre) qui induit des stress structuraux, et par une évolution dans un environnement souvent très altéré par les sociétés humaines (milieu urbain, pollution atmosphérique). Bien que ce dernier point ne soit pas directement applicable aux sites archéologiques du secteur Río Bec, nous pouvons souligner que les constructeurs originels avaient pris soin de recouvrir entièrement les structures de stuc afin de pallier la détérioration des calcaires, dont la faible durabilité était bien connue. C'est ainsi que certaines surfaces bâties du site éponyme de Río Bec présentent les traces de plusieurs dizaines de couches de stuc successives (Michelet, com. pers., mars 2013). En faisant le lien entre cet état de fait et notre discussion sur l'action conjointe des processus érosifs, tout en prenant en compte la période d'abandon des édifices, alors recouverts d'un monticule de terre, puis leur redécouverte, exposition à l'air libre et consolidation, sans oublier leur possible colonisation par les agents biologiques, on peut largement imaginer que la reconstitution du « tempo » de l'érosion (André et Phalip, 2010) sur ces matériaux constitue un défi difficile à relever.

Conscients de ces limites, nous avons cependant cherché à proposer un cadre d'analyse, le *modus operandi*, fondé sur une expertise géomorphologique de connaissance des processus érosifs, de leur signature et des paramètres présidant à leur efficacité, ainsi que sur une caractérisation fine des matériaux et des environnements dans lesquels ils s'inscrivent et évoluent. Par ailleurs, l'emploi d'une locution latine se justifie par le fait que cette proposition est avant tout un modèle conceptuel, et que le terme « mode opératoire » lui aurait conféré un caractère bien trop établi et indiscutable.

2.2. Expertise géomorphologique

Le *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec est en effet issu de l'interprétation des résultats de caractérisation des facteurs de contrôle intrinsèques et extrinsèques, et de la compréhension des interactions qui en découle, fondée sur la confrontation de ces résultats avec la littérature scientifique.

2.2.1. Facteurs intrinsèques

Lors de l'étape de caractérisation des facteurs de contrôle, nous avons accordé une attention particulière à l'analyse pétrographique des matériaux, que nous avons fondée sur une collaboration interdisciplinaire avec des géologues de l'Institut de Géologie de la

UNAM et du groupe d'étude GEGENAA de l'Université de Reims. Nous avons, dans un premier temps, attesté la nature résiduelle des encroûtements carbonatés desquels les constructeurs mayas ont extrait les matériaux de construction du secteur Río Bec. L'origine de ces croûtes calcaires, ou *caliche*, comme elles sont appelées localement, semble relever d'un ensemble de processus diagénétiques, mais surtout biogéniques et pédogénétiques, si l'on confronte les résultats de nos observations en lames minces (Annexe I) et les résultats de diffractométrie aux rayons X (Fig. V-6, p. 175) à l'examen des profils lithostratigraphiques du site éponyme mené par Gillot (2018) et aux caractéristiques détaillées par Linoir (2014) dans un contexte bioclimatique pourtant bien différent.

La principale caractéristique retrouvée dans les échantillons prélevés est la présence de nano-aiguilles de calcite au sein de la porosité des calcaires monumentaux. Ce comblement de la porosité par ces témoins de recristallisation secondaire a également été observé par Straulino *et al.* (2013) sur les matériaux de construction du site éponyme de Río Bec. Selon Verrechia et Verrechia (1994), l'origine de ces nano-aiguilles peut être soit organique et résulter des processus de biominéralisation fongique, soit inorganique et être liée à la précipitation physico-chimique des ions carbonatés dans les sols en lien avec des processus pédogénétiques qui inhibent la croissance latérale des cristaux. Si l'on compare les nano-aiguilles retrouvées dans nos échantillons et les observations par microscopie électronique publiées par Bajnoczi et Kovács-Kis (2006), on ne peut que constater la similarité frappante entre ces nano-aiguilles dans les croûtes calcaires de Hongrie, et leurs homologues retrouvées dans celles du secteur Río Bec (Fig. IX-3). Selon Bajnoczi et Kovács-Kis (2006), l'origine des nano-aiguilles de calcite présentant cette structure et cette organisation est purement biogénique : il s'agit de gaines de mycélium calcifiées, et donc d'une biominéralisation secondaire d'origine fongique. Les plus récents travaux de Bindschedler *et al.* (2012) dans le Jura suisse vont également dans ce sens, ainsi que ceux d'Eren *et al.* (2018), qui insistent sur la favorisation de la calcification du mycélium par la respiration racinaire dans les horizons d'accumulation carbonatés du sud de la Turquie. Il est donc hautement probable que ces nano-aiguilles de calcite retrouvées dans les croûtes calcaires du secteur Río Bec soient d'origine fongique, même s'il faut rester prudent et ne pas écarter l'influence conjointe des processus pédogénétiques et celle des autres organismes.

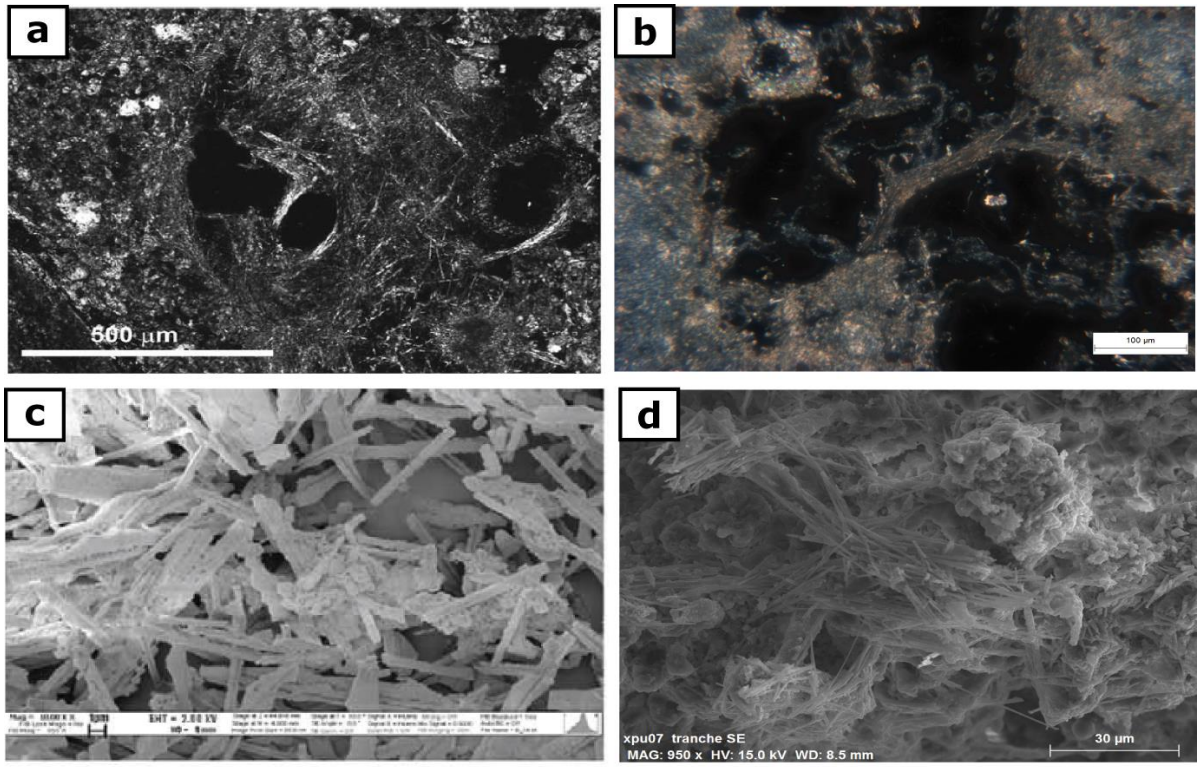


Fig. IX-3. Comparaison des nano-aiguilles observées en lames minces (a) et au MEB (c) par Bajnozxi et Kovács-Kis (2006) ; et celles observées dans le présent travail (b et d).

De même que Straulino (2012), nous sommes tentés d'écarter l'hypothèse de García Solis et Valencia Pulido (1997) et d'Anrubio Vega (1998) sur l'impact du gypse présent dans la stratification locale sur les processus de détérioration. Si de rares éléments sulfatés ont pu être observés en lames minces, leur faible occurence, mais surtout leur position au sein de la roche – sans cristallisation à l'interface avec l'atmosphère – semble indiquer que leur rôle dans la détérioration des matériaux est somme toute assez marginal. Nous rejoignons également les travaux de Straulino *et al.* (2013) sur l'identification des modalités de détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, notamment par dissolution préférentielle de la matrice micritique entraînant la chute consécutive des oncolithes par la perte de cohérence de cette dernière. Nous serions donc de plus en plus enclins à considérer que la durabilité des matériaux de construction est dépendante de cet équilibre entre la progression des mécanismes de biominéralisation secondaire d'un côté, et celle de la dissolution préférentielle de l'autre.

Nous avons toutefois, par l'extension de notre zone d'étude aux sites voisins de Becán et Xpuhil, identifié d'autres faciès présents dans les calcaires monumentaux et

souligné la complexité et la variabilité des structures et textures susceptibles d'être retrouvées dans le secteur, malgré l'apparente homogénéité des matériaux de construction. En effet, par ses aspects physico-chimiques le rendant plus durable que le faciès plus classique des croûtes calcaires, le faciès laguno-continental dolomitique est très largement susceptible d'induire des variabilités dans les réponses aux stress atmosphériques et des différences d'état de conservation sur des espaces réduits explicables par l'imbrication des faciès, comme nous l'avons envisagé sur la figure VIII-6 (p. 271). Cela pourrait également expliquer la représentation importante des processus de délitage dont les signatures ont été très fréquemment observées sur les parements du secteur. En effet, les lignes de faiblesse érodées préférentiellement par une désagrégation linéaire correspondraient soit au faciès croûte calcaire, soit à des plages de micrite présentes dans le faciès laguno-continental dolomitique, moins résistantes que les trames de dolosparite bien cristallisées. De ce processus de délitage découlent mécaniquement les formes de creusement, qui correspondent en réalité au même processus, mais à un stade plus avancé et couplé à l'action de la gravité. Quant aux signatures des processus de dissolution et de desquamation, les premières s'expliquent par la nature carbonatée des matériaux et par leur évolution dans un contexte tropical très humide, les secondes par la présence d'argiles dans leur composition, dont le gonflement et la rétraction au cours des alternances d'humectation et de dessiccation de la roche induit des stress mécaniques (Rodriguez Navarro *et al.,* 1997 ; Sebastián *et al.,* 2008 ; Berthonneau, 2013). L'identification des processus à l'œuvre dans la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec paraît donc assez cohérente, mais la variabilité de leur efficacité doit être estimée, comme nous l'avons proposé sur le *modus operandi,* en fonction des ambiances climatiques dans lesquelles ils s'inscrivent.

2.2.2. Facteurs extrinsèques

Afin de déterminer les modalités de détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, nous avons accordé une grande importance à la caractérisation des facteurs extrinsèques, et notamment des paramètres climatiques. En effet, un grand nombre de travaux menés dans le domaine de l'érosion de la pierre monumentale ne prennent pas la peine d'étudier finement ces paramètres, pourtant responsables des stress atmosphériques auxquels les matériaux vont fournir une réponse, ou se contentent de les intégrer dans un contexte climatique généralisé au niveau régional.

La caractérisation des facteurs de contrôle extrinsèques dans lesquels les monuments s'inscrivent, effectuée par monitoring climatique, a cependant permis de mettre en évidence des différences importantes dans les stress atmosphériques encaissés par les matériaux de construction. Certaines variables, telles que l'orientation des structures, mais aussi leur environnement immédiat, forestier ou dégagé, sont ainsi largement susceptibles d'induire des réponses contrastées aux paramètres climatiques, et donc des régimes d'érosion distincts. Nous avons donc cherché, à travers la caractérisation des facteurs de contrôle extrinsèques, à définir les paramètres climatiques liés aux quatre orientations des structures, ainsi qu'aux ambiances forestières et dégagées. Nous avons par la suite associé ces paramètres climatiques à l'entrée en jeu et à la variation de l'efficacité des processus érosifs dont la signature a été identifiée. En effet, Paradise (2005) a rappelé que l'orientation conditionne l'ensoleillement des parements et ses corollaires la température et l'humidité relative, ainsi que les vitesses d'humectation et de dessiccation. Ces dernières commandent les alternances de gonflement et rétraction des argiles contenues dans les matériaux, et donc un certain niveau de stress mécanique corrélé à l'efficacité des processus de desquamation. Par ailleurs, l'ensoleillement des différentes façades des structures peut favoriser la colonisation biologique par différents organismes, dont certains sont phototrophes (les cyanobactéries de type *Gloeocapsa*), d'autres se développant préférentiellement sur les sections de bâti ombragées (l'algue *Trentepohlia*). Nous avons, à ce sujet, confirmé les observations d'Ortega Morales *et al.* (2013a) sur le site de Becán et les avons élargies à l'ensemble du secteur Río Bec. En effet, nous avons également observé une prédominance des biofilms noirs cyanobactériens sur les façades exposées au sud et à l'ouest, plus ensoleillées, et des patines rosâtres sur les façades exposées au nord et à l'est, plus ombragées, ainsi que sur les surfaces ombragées par la végétation. La logique spatiale de distribution des organismes, mais aussi l'évolution possible des successions végétales et des consortiums tels que nous les avons identifiés (Fig. VIII-10, p. 284), ainsi que leur impact, entre biodétérioration et protection, doit ainsi entrer en compte dans l'évaluation de la conservation des parements et dans l'adéquation des stratégies de restauration.

La caractérisation des paramètres climatiques a donc permis d'associer ce que nous savions des matériaux de construction et des modalités de leur détérioration aux différents environnements dans lesquels ces derniers sont capables d'évoluer. Ainsi, nous avons pu proposer un *modus operandi* prenant en compte les stress atmosphériques et la

façon dont ils favorisent l'entrée en jeu et les variations de l'efficacité des processus érosifs que nous avons identifiés grâce à leur signature sur l'épiderme rocheux. Au total, les résultats de l'ensemble des étapes de travail – à l'exception peut-être de la quantification de l'érosion, pour des raisons que nous évoquerons au point 3.2. du présent chapitre – ont été mis à contribution pour définir les modalités de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Nous avons également cherché à nous inscrire dans une culture scientifique construite à partir de références desquelles nous avons parfois reproduit, parfois étendu les aspects méthodologiques afin de confirmer ou de nuancer les travaux antérieurs. Enfin, nous avons également revendiqué une certaine expertise géomorphologique, bâtie sur une volonté de transdisciplinarité avec l'étude de travaux d'autres disciplines scientifiques, mais surtout sur une connaissance la plus rigoureuse possible des processus érosifs et des facteurs de contrôle qui régissent leur efficacité.

3. Impact des interventions humaines : le forçage anthropique en question

L'objectif final de notre étude, qui s'appuie sur les précédentes étapes de travail, est resté de caractériser le forçage anthropique induit par les interventions humaines sur l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. Ces étapes nous ont permis de mieux connaître les modalités de détérioration de ces matériaux, mais aussi les contrastes susceptibles d'exister en fonction des ambiances dans lesquelles s'inscrivent les structures ou de la morphologie de ces dernières. L'effort d'anamnèse nous a également permis de connaître les opérations dont elles ont fait l'objet, et par le croisement de ces ensembles de résultats, nous avons été en mesure d'identifier plusieurs éléments relatifs à ce forçage anthropique. D'abord, la confirmation de l'impact délétère des rejointoiements au ciment, déjà évoqué dans la littérature, sur lequel nous apportons un nouvel exemple difficilement contestable. Ensuite, les nouveaux éléments de réflexion apportés sur les conséquences des opérations effectuées sur l'environnement immédiat des structures (dégagement du couvert forestier et libération du monticule de terre), et surtout sur la quantification de l'accélération de l'érosion consécutive à ces opérations. Enfin, le questionnement proposé par l'interprétation des résultats ayant trait au mur de la structure V-A de Becán, qui est susceptible de remettre en cause plusieurs paradigmes de la conservation des édifices du secteur.

3.1. Les rejointoiements au ciment : modification des facteurs intrinsèques

Au cours de notre travail, nous avons souligné l'état de détérioration avancé des parements de la structure I de Xpuhil comportant des joints de ciment entre les pierres de taille (voir section 3.2.1. du chapitre VIII, pp. 293-296). Les rejointoiements au ciment opérés sur le site de Xpuhil dans les années quatre-vingt (Piña Chan et Landa, 1983) et quatre-vingt-dix (Bueno *et al.,* 1992) seraient *a priori* responsables de cette accélération de l'érosion et du retrait important observé sur les matériaux de construction des parements concernés, même si d'autres hypothèses ont également été considérées (intervention d'urgence post-détérioration). S'il convient de rester prudent sur la date et l'objectif de cette intervention, tout semble indiquer que l'insertion de ciment dans le bâti coïncide avec les consolidations initiales des portions concernées sur la structure I : par Piña Chan en 1983 pour XPU-01, par Bueno en 1992 pour XPU-07. L'éventualité d'une opération ultérieure, réalisée pour pallier une détérioration des matériaux, reste faible, et aurait en effet été rapportée dans les archives de l'INAH.

Les observations réalisées sur ces parements, de même que l'ensemble des résultats les concernant, vont dans le sens d'une accélération de l'érosion imputable à l'opération de rejointoiement, telle qu'elle a été décrite par Dotter *et al.* (2009) sur les grès des vestiges de *Bonamargy Friary* en Irlande (Fig. IX-4), et par André *et al.* (2014) sur les églises romanes d'Auvergne.

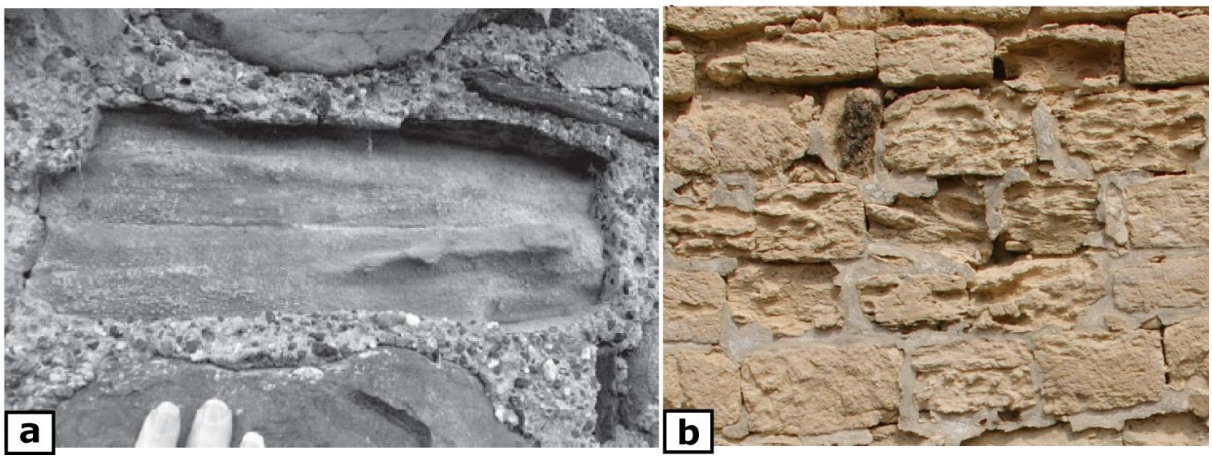


Fig. IX-4. (a) Accélération de l'érosion imputable à un rejointoiement au ciment sur les grès irlandais (Dotter *et al.,* 2009) et sur la structure I de Xpuhil (b).

L'insertion de ciment dans le bâti a donc provoqué une accélération de l'érosion par deux phénomènes : l'apport de sels solubles contenus dans le ciment utilisé, favorisant les processus de desquamation et facilitant le relai par les processus mécaniques une fois perdu le calcin de surface ; et l'imperméabilisation du parement qui a empêché la circulation de l'air et de l'eau au sein des matériaux de construction, favorisant les processus de dissolution dont l'efficacité est accrue par la subsidence de l'humidité au sein du réseau poreux. Nous avons apporté ici un argument supplémentaire en faveur du retrait définitif du ciment dans les opérations de restauration, même si des réflexions sont menées depuis longtemps à ce sujet, et que les acteurs de la restauration dans le secteur Río Bec ont également essayé de favoriser des mortiers similaires aux mélanges originels conçus par les constructeurs mayas. Toutefois, il convient aussi de faire preuve de recul. Il est plus facile, au regard de ces observations et des données, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, de crier au scandale et d'appeler au bannissement du ciment dans toute opération de restauration. Il faut pourtant prendre en compte plusieurs choses. D'une part, si le ciment a en effet des impacts délétères sur le long terme, il demeure un outil de sauvetage tout à fait pertinent lorsqu'il s'agit de sauvegarder l'intégrité structurelle d'un édifice sur le point de défaillir, en attendant des fonds pour une campagne de restauration plus importante. D'autre part, la mise au point d'un mortier de rejointoiement compatible et similaire à celui qui a été utilisé par les constructeurs originels demande un effort particulier pour reconstituer sa composition et ses proportions exactes, ainsi que les techniques de fabrication. Si des travaux scientifiques tels que celui qu'a mené Gillot (2014) sur les mortiers du secteur Río Bec existent, ce n'est pas le cas pour un grand nombre de sites patrimoniaux.

L'impact des interventions directes, telles que ces opérations de rejointoiement incorporant du ciment, a donc été démontré et va dans le sens de ce qui a été évoqué dans la littérature. Nous avons également pu, sur ces fenêtres-là, quantifier des taux de retrait plutôt pertinents grâce aux reliquats de ciment offrant une surface de référence assez fiable (jusqu'à 0,52 cm par an sur XPU-01, et jusqu'à 0,53 cm par an sur XPU-07). Ces taux de retrait maximum sont bien supérieurs à ceux qu'ont pu calculer André *et al.* (2014) sur les grès blancs de Souvigny après leur rejointoiement au ciment (30 mm au maximum sur une période d'exposition 1950-2010, soit 60 ans, ce qui donne 0,5 mm par an), ce qui souligne la faible durabilité des calcaires monumentaux du Río Bec, et leur vulnérabilité face à ce type d'intervention. Dans ce contexte, l'intervention humaine

constitue effectivement un forçage anthropique puisqu'elle modifie les facteurs de contrôle intrinsèques des matériaux (composition chimique en sels solubles, capacité à laisser circuler l'air et l'eau au-delà du réseau poreux) et accélère la succession des processus qui entrent en jeu dans leur érosion. Ainsi, les portions de bâti intervenues connaissent une accélération de leur érosion équivalente à plusieurs décennies d'exposition aux stress atmosphériques, ou à une modification de leur composition chimique.

3.2. Opérations de dégagement et de libération : modification des facteurs extrinsèques

Nous avons également confirmé, et selon les mêmes méthodes, les régimes d'érosion contrastés qui existent au Cambodge sur le patrimoine bâti de la civilisation khmère, entre les structures archéologiques enfouies sous le couvert végétal et celles qui sont exposées à l'air libre (André *et al.,* 2012). Malgré la différence des facteurs intrinsèques (du grès pour les temples d'Angkor, du calcaire pour les sites mayas du Río Bec), les résultats montrent que les édifices sous forêt évoluent dans une ambiance climatique plus fraîche et humide, favorisant les régimes de biodétérioration chimique lente. Au contraire, les édifices exposés à l'air libre s'inscrivent dans une ambiance climatique plus chaude et moins tamponnée, favorisant ainsi les amplitudes hygrothermiques et les alternances humectation-dessiccation, ce qui se traduit par un régime d'érosion plus rapide, avec une efficacité accrue des processus mécaniques. Ce changement de régime d'érosion a déjà été observé par García de Miguel *et al.* dès 1995 sur la grande pyramide de Tikal au Guatemala, où le déboisement à proximité des structures a causé l'écaillage des biofilms cyanobactériens recouvrant l'épiderme rocheux et a soumis les calcaires monumentaux à l'efficacité accrue des stress atmosphériques.

Si nous avons fourni des résultats allant dans le sens de l'effet modérateur du couvert forestier sur les stress atmosphériques en comparant les résultats du monitoring climatique sur les sites de Xpuhil et Xpuhil II, nous avons aussi essayé de déterminer l'impact de la libération des structures du monticule de terre dans lequel elles ont été enfouies avant leur redécouverte, et surtout de quantifier cet impact. Force est de constater que cet objectif s'est heurté à un grand nombre de limites. On peut être tentés, au regard des résultats précédents, d'assimiler la libération du monticule à un dégagement du couvert forestier et ainsi d'émettre l'hypothèse d'un changement

similaire entre un régime d'érosion plutôt lent, dominé par les processus de biodétérioration chimique, et un régime dominé par les processus mécanique, entrainant des pertes de matière plus importante. Cependant, des matériaux de construction enterrés dans un monticule au sein duquel les processus pédogénétiques sont très actifs ne vont pas être soumis aux mêmes modalités de détérioration que s'ils étaient simplement enfouis dans un couvert forestier, aussi dense soit-il. Mais la principale limite quant à l'évaluation de l'impact de ces opérations de libération réside dans la tentative de quantification de la potentielle accélération de l'érosion induite par ces dernières. En effet, nous avons choisi de considérer avec énormément de précaution les résultats de quantification de l'érosion tout au long de leur confrontation avec les autres ensembles de résultats issus des précédentes étapes de travail. Nous avons utilisé les taux de retrait calculés par photogrammétrie multi-images pour apporter des arguments quantitatifs à nos interprétations, notamment sur le mur de la structure V-A de Becán, où les données sont comparables entre elles puisqu'elles ont été collectées sur la même fenêtre photogrammétrique. En revanche, il est apparu difficile de comparer plusieurs fenêtres entre elles pour des raisons purement méthodologiques : la surface de référence à partir de laquelle est calculé le retrait de la pierre est à chaque fois différente et ne peut donc pas être choisie comme référentiel commun à deux collectes de données différentes. Outre le fait que cette surface, toujours plane et extrapolée à partir des points les plus élevés des modélisations en trois dimensions (Fig. III-18, p. 123), n'a en réalité jamais existé, sa définition pose problème en l'absence de marques lapidaires ou autres surfaces clairement datables (André et Phalip, 2010). De surcroît, le calcul de taux de retrait annualisés renvoie à l'écueil cité précédemment qui consiste à envisager la détérioration des matériaux de construction de manière linéaire, en occultant les imbrications des dynamiques érosives et les effets de seuils qui en font un phénomène pulsatoire dont le tempo reste difficile à reconstituer. Par ailleurs, il convient de souligner que si la photogrammétrie multi-images possède un grand nombre d'avantages sur d'autres méthodes de quantification, notamment en termes de logistique et de mise en œuvre sur le terrain, les accumulations d'erreurs dues aux étapes successives de traitements infographiques nécessaires à l'acquisition des résultats reste problématique, comme l'ont évoqué Vautier et Voldoire (2011).

3.3. Le mur de la structure V-A de Becán : bioprotection et rôle de la voûte reconstruite

Tout au long de notre travail, le mur de la structure V-A de Becán nous a particulièrement intéressés, et les résultats des différentes opérations de collecte de données sur ce parement nous ont donné matière à réflexion. En effet, le contraste saisissant entre les deux parties du mur, chacune caractérisée par un état de conservation, des signatures érosives dominantes, et des taux de retrait différenciés nous a amené à considérer une interprétation en deux points. D'abord, le meilleur état de conservation de la partie B est dû au recouvrement cyanobactérien qui s'est développé sur le parement, constituant en lui-même une couche protectrice et induisant un maintien des matériaux dans une ambiance microclimatique favorisant les processus chimiques au détriment des processus mécaniques. Ensuite, cette colonisation biologique est due à l'absence de demi-voûte reconstruite en surplomb du parement vertical, sur lequel l'ensoleillement et le taux d'humidité plus élevés et plus constants correspondent aux prérequis écologiques qui favorisent la croissance et la subsistance des cyanobactéries. Cette interprétation est susceptible de remettre en cause deux paradigmes : celui selon lequel la colonisation biologique est exclusivement destructrice, et celui selon lequel la reconstruction des voûtes doit être systématique afin de mieux conserver les matériaux.

3.3.1. Un biofilm protecteur

Un grand nombre de résultats nous ont donc amené à considérer que le biofilm cyanobactérien recouvrant la partie B du mur de la structure V-A de Becán a un rôle protecteur. Cette interprétation est également justifiée par sa cohérence avec ce qui a été observé dans la littérature, et par l'évolution de l'appréciation du rôle des organismes à la surface de l'épiderme rocheux au sein de la communauté scientifique et chez les acteurs de la conservation des monuments. En effet, un certain nombre de travaux antérieurs permettent de créditer notre interprétation en allant dans le sens du rôle de ce recouvrement biologique en tant que couche protectrice d'une part, et plus largement de celui des cyanobactéries en tant qu'organismes favorisant les mécanismes de biominéralisation au sein de la roche.

La considération des biofilms en tant que couche protectrice est le premier argument des auteurs en faveur de la bioprotection. En effet, ces recouvrements limitent les échanges entre la roche et l'atmosphère (Ariño *et al.,* 1995 ; Pinna, 2014), mais aussi l'agressivité des stress atmosphériques induits par les facteurs extrinsèques. Leur rôle peut ainsi se rapprocher de celui du couvert forestier évoqué par André *et al.* (2012) afin d'expliquer les contrastes de régime d'érosion sur les temples d'Angkor au Cambodge. Nous avons effectivement montré que la partie colonisée du parement évolue dans une ambiance microclimatique plus tamponnée, avec des cycles d'humectation et de dessiccation moins marqués, donc que le biofilm a bien un effet modérateur sur l'agressivité des paramètres climatiques. Pour García de Miguel *et al.* (1995), le biofilm cyanobactérien forme effectivement un « tapis biologique » qui ralentirait l'érosion chimique à la surface des calcaires monumentaux du site maya de Tikal. Nos résultats montrent cependant que l'érosion chimique n'est pas ralentie, mais qu'elle est maintenue à une intensité acceptable, n'entraînant pas de perte de matière importante, mais surtout que ce régime de détérioration retarde – si ce n'est empêche l'entrée en jeu – des processus d'érosion mécanique dont les effets sont bien plus délétères. Si des travaux ont été menés sur les sites archéologiques mayas du Yucatán ont déjà évoqué le rôle protecteur de l'algue *Trentepohlia* (Gaylarde *et al.,* 2006) ou des communautés fongiques (Ortega Morales *et al.,* 2016), nos résultats sont parmi les premiers à envisager celui des recouvrements biologiques d'origine cyanobactérienne en tant que retardateurs des processus érosifs.

Nous avons également envisagé le rôle des cyanobactéries en tant qu'organismes favorisant les mécanismes de biominéralisation. N'oublions pas que nous avons préalablement déterminé que l'état de conservation des calcaires monumentaux du secteur Río Bec est tributaire d'un équilibre entre la progression de l'érosion différentielle et l'avancée des processus de biominéralisation. Si la progression de l'érosion différentielle est susceptible d'être favorisée par la présence du biofilm rétenteur d'humidité augmentant l'efficacité des processus de dissolution, celle-ci est compensée par la restriction des échanges entre la roche et l'atmosphère qui empêche l'entrée en jeu des processus prenant normalement le relai. En ce qui concerne l'avancée des processus de biominéralisation (voir la section 2.2.1. du présent chapitre, pp. 312-315), le potentiel des nano-aiguilles de calcite en la matière a été largement évoqué dans la littérature (Altermann *et al.,* 2006 ; Kamennaya *et al.,* 2012 ; Bundeleva *et al.,* 2014). Les observations par microscopie électronique des recouvrements cyanobactériens que

nous avons prélevés dans le secteur ont montré la présence de nano-aiguilles de calcite pouvant être attribuée aux processus pédogénétiques ou de biominéralisation d'origine fongique (Fig. VIII-5a, p. 270), ce qui n'atteste pas leur rôle en tant qu'organisme favorisant ces mécanismes. En revanche, d'autres observations par microscopie électronique montrant la surface d'un biofilm cyanobactérien (Fig. VIII-5b, p. 270) ressemblent assez à ce qu'a pu être observé par Bundeleva *et al.* (2014) selon la même méthode, après des expériences de biominéralisation par des cyanobactéries de type *Gloeocapsa* en milieu contrôlé abiotique (Fig. I-9, p. 41). Nous sommes donc en mesure d'apporter certains éléments allant en faveur d'une biominéralisation favorisée par les cyanobactéries, dont l'intensité compenserait largement les processus d'érosion différentielle, et conduirait à une meilleure conservation des parements colonisés par ces recouvrements.

3.3.2. La reconstruction des voûtes en question

Si le fait que le biofilm cyanobactérien a un rôle protecteur sur le parement du mur de la structure V-A de Becán semble assez évident, le fait que ce soit la reconstruction de la demi-voûte en surplomb du parement qui soit à l'origine de son développement doit également être envisagé. Cette opération est systématiquement demandée aux archéologues en charge de la consolidation des structures afin d'assurer la conservation des matériaux (Michelet, comm. pers., février 2013). Nous avons à un moment pensé que la reconstruction de la voûte pouvait éventuellement avoir été effectuée *a posteriori* du dégagement de la structure V-A opéré par Messenger en 1974, consécutivement au constat de son état de détérioration avancé. Cependant, nous avons remarqué lors de l'anamnèse des structures que cette demi-voûte était déjà reconstruite lorsque les travaux de Bueno ont commencé dans les années quatre-vingt (voir la section 3. du chapitre VII, pp. 254-257), ce qui nous a amené à considérer les deux hypothèses lors de la quantification des taux de retrait sur ce parement.

En raison de la modification des paramètres climatiques à l'échelle du parement que celle-ci induit, cette reconstruction est susceptible de changer les prérequis écologiques favorisant la colonisation biologique (entrave au ruissellement et moindre exposition à l'ensoleillement) et d'empêcher ainsi la protection du parement par le biofilm cyanobactérien. Nous sommes donc en présence d'une intervention humaine induisant un forçage anthropique en modifiant la morphologie de la structure et donc le

système de pente sur lequel agissent les dynamiques érosives et biologiques. Les facteurs intrinsèques (morphologie du bâti) et extrinsèques (paramètres climatiques) se trouvent ainsi modifiés.

Si le mur de la structure V-A de Becán constitue un cas d'école en la matière, il convient tout de même de ne pas occulter les éléments vont à l'encontre de notre interprétation. En effet, rappelons que cette spatialisation des régimes d'érosion ne s'observe pas systématiquement là où les modalités de reconstruction de la demi-voûte suivent le même schéma. Par ailleurs, les parements situés sous une voûte totale et bien reconstruite, isolant intégralement les matériaux constitutifs de la chambre ainsi recouverte, se trouvent en bien meilleur état de conservation que ceux qui sont surplombés par des demi-voûtes partiellement reconstruites. D'autres éléments peuvent également entrer en jeu : rapports de force entre les parements supportés et la charge sus-jacente pouvant induire une efficacité exacerbée des processus de fragmentation en esquilles, ou contribution du vent aux processus mécaniques lorsque la prise en charge des grains est accélérée par effet venturi. Dans tous les cas, il semble difficile d'attribuer un contraste aussi marqué des régimes d'érosion sur un même parement à des différences de matériaux de construction ou au hasard. Pourtant, aucune étude, parmi celles que nous avons étudiées pour réaliser ce travail, n'a mentionné de cas similaires. Les éléments que nous apportons ici doivent donc pouvoir servir d'amorce à des recherches plus poussées sur ce phénomène, et à une réflexion conjointe des acteurs de la conservation et des chercheurs impliqués dans cette thématique de recherche. En effet, si un changement de stratégie de conservation doit s'effectuer, il doit avant tout s'appuyer sur un consensus scientifique et sur des résultats comparables obtenus dans d'autres contextes.

Au total, nous avons montré que les interventions humaines sur les structures archéologiques du secteur Río Bec ont pu, à plusieurs occasions, constituer un forçage anthropique sur l'érosion des matériaux de construction. En effet, en modifiant les facteurs intrinsèques ou extrinsèques, ces opérations ont pu exacerber ou atténuer l'efficacité de certains mécanismes et processus, et ainsi être à l'origine d'accélérations de l'érosion comparables à plusieurs décennies d'exposition aux stress atmosphériques. Certaines interventions ont eu un impact délétère confirmé et cohérent avec ce qui a été précédemment observé, telles que les rejointoiements au ciment. Nous avons également apporté de nouvelles pistes de réflexion sur les conséquences parfois néfastes des

opérations de restauration (reconstruction des demi-voûtes) ou de mise en valeur des sites (libérations des monticules et dégagement du couvert forestier), dans un contexte où l'interventionnisme croissant des sociétés n'épargne pas la conservation du patrimoine et rejoint les questionnements actuels sur l'entrée dans une nouvelle période géologique appelée Anthropocène.

Conclusion du chapitre IX

Au cours de ce chapitre, nous avons cherché à mettre en perspective l'interprétation des résultats présentée dans le chapitre précédent. A travers la comparaison avec les éléments bibliographiques étudiés pour ce travail, nous avons réussi à consolider certaines hypothèses, mais aussi à en nuancer certaines. Nous avons également proposé un bilan méthodologique et un retour sur expérience relatif à ce qui a été tenté dans ce travail.

L'effort d'anamnèse des structures étudiées s'est révélé indispensable à notre compréhension des modalités de détérioration des calcaires du secteur, et nous avons fait appel à de nombreuses reprises aux résultats de cette étape. En revanche, cette dernière a été limitée par la forme des rapports et le manque de couverture photographique ne permettant pas une exploitation totale de ces résultats. C'est ainsi que nous avons envisagé la création d'un outil de gestion basé sur ce travail d'anamnèse, dont les résultats pourront être intégrés et servir le suivi des monuments concernés par les acteurs de la conservation.

Le *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, tel qu'il a été proposé, a également été critiqué et mis en perspective. En effet, nous avons exposé les principales limites méthodologiques de la stratégie de collecte de données, inspirée par certains travaux antérieurs, mais également étendue de manière assez inédite à un corpus d'une dizaine de structures appartenant à un même secteur archéologique. Conscients de ces limites et des écueils dans lesquels nous sommes tombés, nous avons tout de même cherché à légitimer nos résultats en les fondant sur une expertise géomorphologique, mais également transdisciplinaire. C'est la connaissance des processus, formes, et facteurs de contrôle de l'érosion qui nous a permis d'apporter des éléments d'interprétation cohérents dont la mise en perspective avec la littérature a montré la pertinence.

Enfin, nous avons également mis en question le forçage anthropique induit par les interventions humaines, et montré que, à différentes échelles et selon différents mécanismes, ces dernières sont susceptibles de modifier les facteurs de contrôle de l'érosion de la pierre monumentale, et que leur rôle ne doit pas être négligé dans une optique d'amélioration des stratégies de conservation.

Épilogue

Entreprendre l'étude de l'érosion des monuments fait écho à un certain nombre de concepts et de thématiques de la géomorphologie dynamique. C'est également un formidable creuset pour les collaborations interdisciplinaires et une thématique de recherche qui peut trouver une traduction concrète en termes de conservation du patrimoine bâti. D'un point de vue plus philosophique, on peut aussi y voir une allégorie du passage souverain du temps.

Le travail que nous avons présenté nous a amené à introduire le concept d'Anthropocène, non pas en discutant de son point de départ, mais en justifiant son émergence à travers la mise en évidence d'un interventionnisme croissant des sociétés et d'un forçage anthropique de plus en plus fort sur les systèmes « naturels ». Les vestiges archéologiques du secteur Río Bec ont passé la majeure partie de leur existence enfouis dans des monticules de terre au cœur d'une forêt tropicale. Ils étaient pourtant, dès leur construction originelle, la traduction de l'*hubris* d'une société qui a extrait, taillé, et inséré des roches carbonatées dans un ensemble complexe et socialement construit. Ces pierres, devenues matériaux, ont été ensuite abandonnées pendant des siècles puis redécouvertes, et elles ont une nouvelle fois fait l'objet de l'intervention de l'homme afin que l'on puisse les conserver en tant que témoins d'une réalité passée que l'on souhaite transmettre, c'est-à-dire en tant que patrimoine. Au fil de cette recherche, dont les objectifs, méthodes et résultats, étaient avant tout scientifiques, cette idée selon laquelle les vestiges archéologiques doivent être conservés pour que nous puissions transmettre le témoignage d'une civilisation n'a jamais quitté l'auteur. On introduit souvent le concept d'Anthropocène pour mettre en garde contre les conséquences néfastes du changement global et des problématiques environnementales auxquelles nos sociétés sont confrontées. Mais il convient également de se rappeler que si l'Homme est devenu une force géologique majeure, c'est aussi une espèce astucieuse, ouvrière et laborieuse, dont la diversité des constructions sociales et artistiques n'a pas d'équivalent connu, que ce soit sur Terre ou ailleurs.

Comment dès lors conserver le patrimoine dans sa globalité et dans sa diversité ? La question de la valeur patrimoniale n'est pas en question ici, il s'agit plutôt de se demander comment la recherche scientifique doit entrer en interaction avec la gestion

concrète du patrimoine. Pour Louis Pasteur (1822-1895), il n'existait pas de « recherche appliquée », mais seulement des applications de la recherche. L'étude de la détérioration de la pierre monumentale n'est pas une fin en soi, elle trouve son caractère appliqué au moment même où l'on a choisi cette thématique. Il est évident que si la meilleure connaissance des processus érosifs constitue un objectif attrayant pour le géomorphologue, il ne peut se contenter de concevoir le monument comme un simple laboratoire destiné à leur étude. Le monument devient un objet d'étude parce qu'il est avant tout un objet construit socialement qui a une valeur patrimoniale. Lorsque Victor Hugo écrivit *Notre-Dame de Paris* en 1832, il intégrait dans son roman une réflexion sur le patrimoine architectural en expliquant, dans le chapitre *Ceci tuera cela*, que « la plume détrônerait la pierre », c'est-à-dire que l'invention de l'imprimerie impliquerait la prédominance du livre comme vecteur de transmission, au détriment de l'architecture. L'incendie du 15 avril 2019 et les milliards d'euros de promesse de dons qu'il a suscité en quelques heures montre pourtant que les sociétés sont tout autant attachées à leur patrimoine architectural qu'à leur patrimoine immatériel. Pour ce dernier, les géomorphologues ne sont pas qualifiés, ils peuvent en revanche apporter une expertise pour le premier, comme l'ont montré les nombreux travaux conduits par les géographes physiciens sur les monuments historiques depuis les années quatre-vingt.

Effectivement, une approche de géomorphologie dynamique prend tout son sens dans l'étude de la détérioration de la pierre monumentale. En particulier car c'est une approche holistique et intégrée, mais également parce que la familiarité des géographes avec les questions anthropiques ne les empêche pas de bien connaître les systèmes naturels. En effet, pour que les échanges interdisciplinaires soient fructueux dans cette thématique, la transdisciplinarité du géomorphologue est un prérequis. Sans jamais se revendiquer autant expert de la colonisation biologique qu'un microbiologiste, ou prétendre connaître les aspects architectoniques aussi bien qu'un archéologue ou un historien du bâti, il doit néanmoins apprendre, se former, et surtout sélectionner quoi apprendre et sur quoi se former. Il s'agit avant tout de savoir dépasser son champ de compétences lorsque le questionnement l'impose, et non de sortir de son champ disciplinaire. Il peut ainsi devenir difficile, pour le géomorphologue, de garder ses objectifs en ligne de mire et son approche en fil directeur. Pourtant, à travers les nombreux échanges qui ont enrichi ce travail, nous avons tenté de garder un ancrage disciplinaire tant au niveau du questionnement que des méthodes et outils. L'interdisciplinarité reste une plus-value dans cette thématique, où l'archéologue, le

géologue, le microbiologiste, l'architecte, le gestionnaire peuvent apporter un angle de vue différent. Au cœur de ce réseau d'échanges, le géomorphologue garde un cap : celui de quantifier, catégoriser, spatialiser et d'identifier des effets de seuils et des relais de processus érosifs. Mais il aura toujours besoin que l'archéologue lui donne les clés de compréhension du bâti, que le microbiologiste l'aide à identifier les organismes colonisateurs et à évaluer leur impact, que le géologue lui apporte sa connaissance fine de la roche, et que le gestionnaire lui rappelle les tenants et les aboutissants de la conservation du patrimoine.

Le lecteur de ce manuscrit doit aussi avoir conscience que les résultats de cette recherche représentent l'état de conservation des vestiges étudiés à un instant T, et que depuis, l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec poursuit son œuvre. Les processus érosifs agissent en continu, éternels et inéluctables. Ils sont l'expression même d'un ordre des choses souverain qui ne peut être totalement stoppé, juste enrayé, au mieux ralenti, mais aussi accéléré. Ils sont aux surfaces rocheuses ce que le vieillissement est à notre corps, une marche perpétuelle vers une disparition annoncée. Un jour le patrimoine inestimable que constituent les vestiges du secteur Río Bec pourrait être amené à disparaître, comme tant de monuments à travers le monde. Pourtant, le témoignage qu'il représente, les indications qu'il nous donne sur une civilisation disparue, ont une grande valeur patrimoniale. La question que soulève leur conservation est finalement simple : acceptons-nous que le temps passe ?

Bibliographie

ALONSO-ZARZA, A. M., (1999), Initial stages of laminar calcrete formation by roots: Examples from the Neogene of central Spain, *Sedimentary Geology*, vol. 126, n°1-4, pp. 177-191.

ALONSO-ZARZA, A. M. & WRIGHT, V. P., (2010), Calcretes, dans : ALONSO-ZARZA , A. M. et TANNER L. H. (éds.), *Carbonates in Continental Settings Facies, Environments, and Processes*, Elsevier, Amsterdam, pp. 225-267.

ALTERMANN, W., KAZMIERCZAK, J., OREN, A. & WRIGHT, D. T., (2006), Cyanobacterial calcification and its rock-building potential during 3.5 billion years of Earth history, *Geobiology*, vol. 4, pp. 147-166.

ANDRE, M.-F., ETIENNE, S., MERCIER, D., VAUTIER, F. & VOLDOIRE, O., (2008), Assessment of sandstone deterioration at Ta Keo temple (Angkor): first results and future prospects, *Environmental Geology*, vol. 56, n°3-4, pp. 677-688.

ANDRE, M.-F. & PHALIP, B., (2010), Rates of stone recession on Mediaeval monuments : some thoughts and methodological perspectives, *Cadernos Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, vol. 35, pp. 13-40.

ANDRE, M.-F., PHALIP, B., VOLDOIRE, O., ROUSSEL, E., VAUTIER, F. & MOREL, D., (2012a), Quantitative assessment of post-restoration accelerated stone decay due to compatibility problems (St. Sebastian's Abbey Church, Manglieu, French Massif Central), dans : *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, New York, 22-26 October 2012*, pp. 1-9.

ANDRE, M.-F., PHALIP, B., VOLDOIRE, O., VAUTIER, F., GERAUD, Y., BENBAKKAR, M., MORVAN, G., (2010), Weathering of sandstone lotus petals at the Angkor site: a 1,000-year stone durability trial, *Environmental Earth Sciences*, vol. 63, n°7-8, pp. 1723-1739.

ANDRE, M.-F., VAUTIER, F., VOLDOIRE, O., PHALIP, B. & ROUSSEL, E., (2011), *Contribution de Geolab au projet de coopération international pour la conservation des parements sculptés du temple de Ta Keo*, Siem Raep.

ANDRE, M.-F., VOLDOIRE, O., ROUSSEL, E., VAUTIER, F., PHALIP, B. & PEOU, H., (2012b), Contrasting weathering and climate regimes in forested and cleared sandstone temples of the Angkor region, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 37, n°5, pp. 519-532.

ANDRE, M.-F., VOLDOIRE, O., VAUTIER, F., ROUSSEL, E., PHALIP, B. & MOREL, D., (2014), Impact of cement repointing on rates of sandstone decay in medieval churches of the French Massif Central, *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 391, n°1, pp. 157-174.

ANGELI, M., BIGAS, J.-P., BENAVENTE, D., MENENDEZ, B., HEBERT, R. & DAVID, C., (2006), Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage, *Environmental Geology*, vol. 52, n°2, pp. 205-213.

ARIÑO, X., ORTEGA-CALVO, J., GOMEZ-BOLEA, A. & SAIZ-JIMENEZ, C., (1995), Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudia (Cadiz, Spain): biodeterioration vs. bioprotection, *The Science of the Total Environment*, vol. 167, n°1-3, pp. 353–363.

ARNAULD, M. C., MICHELET, D. & NONDEDEO, P., (2013), Living Together in Río Bec Houses: Coresidence, Rank, and Alliance, *Ancient Mesoamerica*, vol. 24, n°02, pp. 469-493.

ARNAULD, M.-C., MICHELET, D., ANDRIEU, C., LEMONNIER, É., VANNIERE, B., NONDEDEO, P., … LEMONNIER, É., (2014), Río Bec. Des grandes maisons et des récoltes, *Journal de la Société des Américanistes*, vol. 100, n°2, pp. 107-144.

ARRUBIO-VEGA, E. J., (1998), *Causas y efectos de deterioro de los materiales arqueológicos calcáreas del sur de Quitana Roo y una propuesta para su conservación*, ENCRyM, Mexico D.F. 207 p.

BACHELARD, G., (1938), *La formation de l'esprit scientifique*, La Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 306 p.

BAJNÓCZI, B. & KOVÁCS-KIS, V., (2006), Origin of pedogenic needle-fiber calcite revealed by micromorphology and stable isotope composition—a case study of a Quaternary paleosol from Hungary, *Chemie der Erde - Geochemistry*, vol. 66, n°3, pp. 203-212.

BALL, J. W., (1973), *Ceramic sequence at Becan, Campeche, Mexico*, University of Wisconson, Madison.

BALL, J. W., (2014), Rethinking the becan ceramic sequence-disjunctions, continuities, segmentation, and chronology, *Latin American Antiquity*, vol. 25, n°4, p. 427-448.

BAUDEZ, C.-F., (2009), *Les Mayas*, Les Belles Lettres, Paris, 270 p.

BAUTISTA-ZUÑIGA, F., PALACIO-APONTE, G., QUINTANA, P. & ZINCK, J. A., (2011), Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico, *Geomorphology*, vol. 135, n°3-4, pp. 308-321.

BAUTISTA-ZUÑIGA, F., PALMA-LÓPEZ, D. & HUCHIN-MALTA, W., (2005), Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán, dans : BAUTISTA-ZUÑIGA, F. et PALACIO G. (éds.), *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*, Universidad Autonoma de Campeche, Universidad Autonoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, pp. 105-122.

BECK, K., (2006), *Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Université d'Orléans. 244 p.

BECK, K., AL-MUKHTAR, M., ROZENBAUM, O. & RAUTUREAU, M., (2003), Characterization , water transfer properties and deterioration in tuffeau : building material in the Loire valley — France, *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1151-1162.

BENAVENTE, D., GARCIA DEL CURA, M. A., BERNABÈU, A. & ORDOÑEZ, S., (2001), Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method, *Engineering Geology*, vol. 59, n°3-4, pp. 313-325.

BENAVENTE, D., GARCÍA DEL CURA, M. A., FORT, R. & ORDOÑEZ, S., (2004), Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength, *Engineering Geology*, vol. 74, n°1-2, pp. 113-127.

BERTHONNEAU, J., (2013), *Le rôle des minéraux argileux dans la dégradation de la pierre : Application à la conservation de la « Pierre du Midi » en termes de durabilité et compatibilité des matériaux en oeuvre*, Université d'Aix-Marseille. 377 p.

BINDSCHEDLER, S., MILLIERE, L., CAILLEAU, G., JOB, D. & VERRECCHIA, E. P., (2012), An Ultrastructural Approach to Analogies between Fungal Structures and Needle Fiber Calcite, *Geomicrobiology Journal*, vol. 29, n°4, pp. 301-313.

BLOWS, J. F., CAREY, P. J. & POOLE, A. B., (2003), Preliminary investigations into Caen Stone in the UK ; its use , weathering and comparison with repair stone, *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1143-1149.

BONAZZA, A., MESSINA, P., SABBIONI, C., GROSSI, C. M. & BRIMBLECOMBE, P., (2009), Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe, *Science of the Total Environment*, vol. 407, n°6, pp. 2039-2050.

BONNEVAL, H., (1972), *Photogrammétrie générale*, Collection Scientifique de l'IGN, Paris, pp. 232, 361 et 312.

BRIMBLECOMBE, P., (2003), *The Effects of Air Pollution on the Built Environment*, Imperial College Press, London, 448 p.

BUENO CANO, R., (1999), Entre un río de robles. Un acercamiento a la arqueología de la región de Río Bec, *Collección Cientifica*, vol. 411.

BUENO CANO, R., AZCARATE SOTO, M. A., CANTERO AGUILAR, M. DE LOS A., HERNÁNDEZ CASTELLANOS, L. & RAMÍREZ RAMÍREZ, D., (1994), *Informe de la temporada 1993. Proyecto arqueológico del Sur de Campeche, Región Río Bec 1991-1994*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 203 p.

BUENO CANO, R., AZCARATE SOTO, M. A., CANTERO AGUILAR, M. DE LOS A., PACHECO BENÍTEZ, A., RAMÍREZ RAMÍREZ, D. & ZARAGOZA BALDERAS, E., (1992), *Informe Reporte preliminar de las excavaciones en la región Río Bec, octubre 1991 - septiembre 1992. Proyecto arqueológico del Sur de Campeche, 1992*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 255 p.

BUENO CANO, R. & GUTIERREZ, M. DE LA L., (1985), *Informe de los trabajos de campo del Proyecto arqueológico Becan Hormiguero*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 124 p.

BUGINI, R., LAURENZI, M. & REALINI, M., (2000), Rate of formation of black crusts on marble. A case study, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, pp. 111-116.

BUNDELEVA, I. A., SHIROKOVA, L. S., POKROVSKY, O. S., BÉNÉZETH, P., MÉNEZ, B., GÉRARD, E. & BALOR, S., (2014), Experimental modeling of calcium carbonate precipitation by cyanobacterium Gloeocapsa sp., *Chemical Geology*, vol. 374-375, pp. 44-60.

BURFORD, E. P., HILLIER, S. & GADD, G. M., (2006), Biomineralization of Fungal Hyphae with Calcite (CaCO 3) and Calcium Oxalate Mono- and Dihydrate in Carboniferous Limestone Microcosms, *Geomicrobiology Journal*, vol. 23, n°8, pp. 599-611.

BUTTERLIN, J.-Y. & BONET, F., (1963), Mapas geológicos de la península de Yucatán, *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 17, n°1, pp. 63-82.

CAMPAÑA VALENZUELA, L. E., (2005), Contribuciones a la historia de Becán, *Arqueología Mexicana*, vol. 75, pp. 48-53.

CAMPAÑA VALENZUELA, L. E., ANGULO TORRES, E., DZUL, S., GARCÍA SOLIS, C. & BOUCHER, S., (2001), *Informe Anual de la temporada de campo 2000 – 2001, Proyecto Arqueológico Becan, Campeche*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 250 p.

CAMUFFO, D. & GIORIO, R., (2003), Quantitative Evaluation of Water Deposited

by Dew on Monuments, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 107, n°107, pp. 655-672.

CARDELL, C., BENAVENTE, D. & RODRÍGUEZ-GORDILLO, J., (2008), Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms, *Materials Characterization*, vol. 59, n°10, pp. 1371-1385.

CARRASCO VARGAS, R., (1993), Edificios de torres: Un problema arquitectónico, *Cuadernos Culturales*, n°2, pp. 3-22.

CASTRO MORA, J., (2002), *Monografía Geológico-Mineral del estado de Campeche: México*, Mexico DF. 154 p.

CHAROLA, E. A., PÜHRINGER, J. & STEIGER, M., (2006), Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials, *Environmental Geology*, vol. 52, n°2, pp. 339-352.

CHEN, J., BLUME, H.-P. & BEYER, L., (2000), Weathering of rocks induced by lichen colonization — a review, *Catena*, vol. 39, n°2, pp. 121-146.

CNUDDE, V., CWIRZEN, A., MASSCHAELE, B. & JACOBS, P. J. S., (2009), Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes, *Engineering Geology*, vol. 103, n°3-4, pp. 76-83.

CONCHA-LOZANO, N., (2012), *Compatibilité et durabilité des pierres de substitution dans les monuments. Aspects physicochimiques et visuels*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. 252 p.

CRISPIM, C. A. & GAYLARDE, C. C., (2005), Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: a review., *Microbial ecology*, vol. 49, n°1, pp. 1-9.

CRUTZEN, P., (2002), Geology of Mankind, *Nature*, vol. 415, n°23.

DE LA ROSA GARCIA, S., ORTEGA-MORALES, O., CLAIRE GAYLARDE, C., BELTRÁN-GARCÍA, M., QUINTANA-OWEN, P. & REYES-ESTEBANEZ, M., (2011), Influence of fungi in the weathering of limestone of Mayan monuments, *Revista Mexicana de Micologia*, vol. 33, n°October 2010, pp. 43-51.

DELGADO RODRIGUES, J., (2015), Defining, mapping and assessing deterioration patterns in stone conservation projects, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 16, n°3, pp. 267-275.

DELVERT, J., (1963), Recherches sur l' « érosion » des grès des monuments d'Angkor, *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, vol. 51, pp. 453-534.

DEMAREST, A., (2004), *Les Mayas*, Cambridge University Press, Paris, 414 p.

DENECKER, M., (2014), *Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale*, Université de Cergy Pontoise. 260 p.

DESSANDIER, D., SAYAGH, S., BROMLET, P., LEROUX, L., DESSANDIER, D., SAYAGH, S., … LEROUX, L., (2009), La pierre de construction, matériau du développement durable, *Geosciences*, pp. 8-15.

DOEHNE, E. & PRICE, A. C., (2010), *Stone Conservation, an overview of current research.*, Los Angeles. 175 p.

DONEUS, M., VERHOEVEN, G., FERA, M., KUCERA, M. & NEUBAUER, W., (2011), From deposit to point cloud - A study of low-cost computer vision approaches straightforward documentation of archaeological excavations, In : *XXIIIrd International CIPA Symposium*, pp. 81-88.

DOTTER, K. R., SMITH, B. J., MCALLISTER, J. J. & CURRAN, J., (2009), Sacrifice

and Rebirth : The History of Lime Mortar in the North of Ireland, In : *Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus*, pp. 499-506.

DURÁN, R. & MÉNDEZ, M., (2010), Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, *Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA*, pp. 4-6.

DUSSOL, L., ELLIOTT, M., PEREIRA, G. & MICHELET, D., (2016), The use of Firewood in Ancient Maya Funerary Rituals: A Case Study from Rio Bec (Campeche, Mexico), *Latin American Antiquity*, vol. 27, n°1, pp. 51-73.

DZUL, S. & TALADOIRE, É., (2010), Espacio y cronología en la perifería de Río Bec, In : A. BENAVIDES et E. VARGAS PACHECO (éd.), *La peninsula de Yucatán: investigaciones recientes y cronologías alternativas*, Universidad Autonoma de Campeche, CampecheCollección, pp. 121-134.

EREN, M., KAPLAN, M. Y., KADIR, S. & KAPUR, S., (2018), Biogenic (β-fabric) features in the hard laminated crusts of the Mersin and Adana regions, southern Turkey and the role of soil organisms in the formation of the calcrete profiles, *Catena*.

ETIENNE, S., (2008), Le paysage français de la recherche sur la dégradation et la conservation de la pierre monumentale, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 1, pp. 59-66.

EYSSAUTIER-CHUINE, S., MARIN, B., THOMACHOT-SCHNEIDER, C., FRONTEAU, G., SCHNEIDER, A., GIBEAUX, S. & VAZQUEZ, P., (2016), Simulation of acid rain weathering effect on natural and artificial carbonate stones, *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, n°9, pp. 748.

EZZDINE, R., (2009), *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, Université Bordeaux I. 241 p.

FARKAS, O., SIEGESMUND, S., LICHA, T. & TÖRÖK, Á., (2018), Geochemical and mineralogical composition of black weathering crusts on limestones from seven different European countries, *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, n°5.

FITZNER, B. & HEINRICHS, K., (1991), Weathering Forms and Rock Characteristics of Historical Monuments Carved From Bedrocks in Petra/Jordan, *Science, Technology and European Cultural Heritage*, pp. 908-911.

FITZNER, B., (2004), Documentation and evaluation of stone damage on monuments, In : *10th International Congress on deterioration and Conservation of Stone - Stockholm 2004*, pp. 677-690

FITZNER, B., HEINRICHS, K. & KOWNATZKI, R., (1997), Weathering forms at natural stone monuments - classification, mapping and evaluation, *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, vol. 3, n°2, pp. 105-124.

FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D., (2002), Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt, *Geological Society Special Publication*, vol. 205, n°Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies, pp. 217-239.

FRANZONI, E., VOLPI, L., BONOLI, A., SPINELLI, R. & GABRIELLI, R., (2018), The environmental impact of cleaning materials and technologies in heritage buildings conservation, *Energy and Buildings*, vol. 165, pp. 92-105.

FREYTET, P. & VERRECCHIA, E., (1989), Les carbonates continentaux du pourtour méditerranéen : microfaciès et milieux de formation, *Méditerranée*, vol. 68, n°2, pp. 5-28.

GADD, G. M. & DYER, T. D., (2017), Bioprotection of the built environment and

cultural heritage, *Microbial Biotechnology*, vol. 5, n°10, pp. 1152-1156.

GARCIA DE MIGUEL, J., SANCHEZ-CASTILLO, L., GIL, J. & SAIZ-JIMENEZ, C., (1995), Deterioration of Building Materials from the Great Jaguar Pyramid at Tikal, *Building and Environment*, vol. 30, n°4, pp. 591-598.

GARCIA-SOLIS, C. A. & VALENCIA-PULIDO, S. B., (1997), *El deterioro de piedra en la zona arqueológica de Chicanná y una propuesta para su conservación*, ENCRyM, Mexico D.F.

GAYLARDE, C. C. & GAYLARDE, P. M., (2005), A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 55, n°2, pp. 131-139.

GAYLARDE, P. M., ENGLERT, G. E., ORTEGA-MORALES, B. O. & GAYLARDE, C. C., (2006), Lichen-like colonies of pure Trentepohlia on limestone monuments, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 58, n°3-4, pp. 119-123.

GENDROP, P., (1983), *Los Estilos Río Bec, Chenes y Puuc en la Arquitectura Maya*, Universidad Autonoma de México, México.

GENET, P.-E., (2012), *L'érosion des calcaires monumentaux du Yucatan*, Mémoire de Master, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand. 92 p.

GILLOT, C., (2018), *L'art de bâtir à Río Bec, volume I*, Thèse de doctorat, Université de Montréal. 450 p.

GILLOT, C., (2014), The use of pozzolanic materials in Maya mortars: new evidence from Río Bec (Campeche, Mexico), *Journal of Archaeological Science*, vol. 47, pp. 1-9.

GOMEZ-HERAS, M. & MCCABE, S., (2015), Weathering of stone-built heritage: A lens through which to read the Anthropocene, *Anthropocene*, vol. 11, pp. 1-13.

GONZÁLEZ-GÓMEZ, W. S., QUINTANA, P., GÓMEZ-CORNELIO, S., GARCÍA-SOLIS, C., SIERRA-FERNANDEZ, A., ORTEGA-MORALES, O. & DE LA ROSA-GARCÍA, S. C., (2018), Calcium oxalates in biofilms on limestone walls of Maya buildings in Chichén Itzá, Mexico, *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, n°6, pp. 1-12.

GORBUSHINA, A. A., (2007), Life on the rocks, *Environmental Microbiology*, vol. 9, n°7, pp. 1613-1631.

GOUDIE, A., (1973), *Duricrusts in tropical and subtropical landscapes*, Oxford University Press, Oxford, 174 p.

GOUROU, P., (1982), *Terres de bonnes espérances, le monde tropical*, Terres Humaines, Plon, Paris, 455 p.

GRASSEGGER, G., (1999), Decay mechanisms of natural building stones on monuments - A review of the latest theories, In : *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen*, StuttgartIWB, pp. 54-81.

GUILLITTE, O., (1995), Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies, *Science of the Total Environment*, vol. 167, n°1-3, pp. 215-220.

HALL, K., MEIKLEJOHN, I. & AROCENA, J. M., (2007), The thermal responses of rock art pigments: implications for rock art weathering in southern Africa, *Geomorphology*, n°91, pp. 132-145.

HAMIDI, E. M., COLIN, F., MICHARD, A., BOULANGE, B. & NAHON, D., (2001), Isotopic tracers of the origin of Ca in a carbonate crust from the Middle Atlas, Morocco, *Chemical Geology*, vol. 176, n°1-4, pp. 93-104.

HEINRICHS, K., (2008), Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan, *Environmental Geology*, vol. 56, n°3-4, pp. 643-675.

HERAUD-PIÑA, M.-A., (1996), *Le Karst du Yucatan, Pays des Mayas*, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux, 282 p.

HERBERT, F., (1965), *Dune*, Pocket S.F. 822 p.

HERNANDEZ HERNANDEZ, C. M. DEL C., (1983), *Informe. Proyecto Becan, Camp. Temporada 1983*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 20 p.

HUFTY, A., (2001), *Introduction à la climatologie*, Presses Universitaires de Laval, Laval, 545 p.

HUSSON, F., SE, L. & MAZET, J., (2007), FactoMineR : Factor Analysis and Data Mining with R. http://factominer.free.fr

HUSSON, F., SE, L. & PAGES, J., (2016), *Analyse de données avec R*, Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 238 p.

HYVERT, G., (1973), Borobudur, les bas-reliefs: Materiaux: facteurs responsables des degradations: programme de conservation, *Studies in Conservation*, vol. 18, n°3, pp. 131-155.

INKPEN, R. J., FONTANA, D. & COLLIER, P., (2001), Mapping decay: integrating scales of weathering within a GIS, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, n°8, pp. 885-900.

ISLEBE, G. A., CALME, S., LEON-CORTES, J. L. & SCHMOOK, B., (2015), Biodiversity and conservation of the Yucatán Peninsula, *Biodiversity and Conservation of the Yucatan Peninsula*, n°November, pp. 39-53.

ISPHORDING, W. & WILSON, E. M., (1973), Weathering Processes and Physical Subdivisions of Northern Yucatan, In : *Proceedings of the AAG, Washington, D.C.*, pp. 117-121.

JANVIER-BADOSA, S., BECK, K., BRUNETAUD, X. & AL-MUKHTAR, M., (2013), Les desquamations en plaques du tuffeau : simulation expérimentale du mode de pénétration du gypse, In : *31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013*, pp. 1-10.

JAYNES, S. M. & COOKE, R. U., (1987), Stone Weathering in Southeast England, *Atmospheric Environment*, vol. 21, n°7, pp. 1601-1622.

JIMENEZ-LOPEZ, C., JROUNDI, F., RODRIGUEZ-GALLEGO, M., ARIAS, J. M. & GONZALEZ-MUÑOZ, M. T., (2007), Biomineralization induced by Myxobacteria, *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*, pp. 143-154.

KAMENNAYA, N., AJO-FRANKLIN, C., NORTHEN, T. & JANSSON, C., (2012), Cyanobacteria as Biocatalysts for Carbonate Mineralization, *Minerals*, vol. 2, pp. 338-364.

KHALAF, F. I. & AL-ZAMEL, A., (2016), Petrography, micromorphology and genesis of Holocene pedogenic calcrete in Al-Jabal Al-Akhdar, Sultanate of Oman, *Catena*, vol. 147, pp. 496-510.

KONTA, J., (2009), Phyllosilicates in the sediment-forming processes: Weathering, erosion, transportation, and deposition, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, vol. 6, n°1, pp. 13-43.

KONTA, J., (2005), Clay minerals including related phyllosilicates: interdisciplinary research and inward integration, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, vol. 2, n°2, pp. 53-68.

KUMAR, R. & KUMAR, A. V., (1999), *Biodeterioration of Stone in Tropical Environments : An Overview*, The Getty Conservation Institute, Washington D.C., 85 p.

LEFEVRE, M., (1974), La « Maladie Verte » de Lascaux, *Studies in conservation*, vol. 19, n°3, pp. 126-156.

LEMONNIER, E. & VANNIERE, B., (2013), Agrarian Features, Farmsteads, and

Homesteads in the Río Bec Nuclear Zone, Mexico., *Ancient Mesoamerica*, vol. 24, n°2013, p. 397-413.LEVI-STRAUSS, C., (1955), *Tristes Tropiques*, Paris, 497 p.

LEWIS, S. L. & MASLIN, M. A., (2015), Defining the Anthropocene, *Nature*, vol. 519, n°7542, pp. 171-180.

LINOIR, D., (2014), *Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne : répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques*, Université Reims Champagne-Ardenne. 340 p.

LITTMANN, E. R., (1958), Ancient mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: the composition and origin of sascab, *American Antiquity*, vol. 24, n°2, pp. 172-176.

LOPEZ RAMOS, E., (1973), Estudio Geologico de la peninsula de Yucatan, In : EDICION ESCOLAR (éd.), *Geologia de México*, México DF, pp. 24-76.

LOPEZ-ARCE, P., DOEHNE, E., MARTIN, W. & PINCHIN, S., (2008), Sales de sulfato magnésico y materiales de edificios históricos : simulación experimental de laminaciones en calizas mediante ciclos de humedad relativa y cristalización de sales Magnesium sulfate salts and historic building materials : experimental simul, *Materiales de Construcción*, vol. 58, pp. 125-142.

MARTÍNEZ, E. & GALINDO LEAL, C., (2002), La vegetación de Calakmul : Descripción , composición y distribución Sociedad Botánica de México, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, vol. 71, n°71, pp. 7-32.

MAXWELL, I., (1992), Stone Cleaning - for better or worse?, In : A. WEBSTER (éd.), *Proceedings of the International Conference held in Edinburgh, UK, 14-16 april 1992*, Donhead Publishing, London.

MCNAMARA, C. J. & MITCHELL, R., (2005), Microbial deterioration of historic stone, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 3, n°8, pp. 445-451.

MCNAMARA, C. J., PERRY, T. D., BEARCE, K. A, HERNÁNDEZ-DUQUE, G. & MITCHELL, R., (2006), Epilithic and endolithic bacterial communities in limestone from a Maya archaeological site., *Microbial ecology*, vol. 51, n°1, pp. 51-64.

MEIERDING, T. C., (1993a), Marble Tombstone Weathering and Air Pollution in North America, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 83, n°4, pp. 568-588.

MEIERDING, T. C., (1993b), Inscription legibility method for estimating rock weathering rates, *Geomorphology*, vol. 6, pp. 273-286.

MERWIN, R. E., (1913), *The ruins of the Southern part of the peninsula of Yucatan, with special reference to their place in the Maya area*, Harvard University, Cambridge.

MESSENGER, L. C., (1975), *Proyecto Becan 1974*, University of the Americas, Puebla.

MICHELET, D., ARNAULD, C., NONDEDEO, P., TALADOIRE, É., DZUL, S., ANDRIEU, C., … LATSANOPOULOS, N., (2008), *Proyecto Rio Bec (Campeche, México). Informe de la sexta temporada del 4 de febrero al 3 de mayo de 2007*. 186 p.

MICHELET, D., ARNAULD, M.-C. & NONDEDEO, P., (2008), Rio Bec (Basses Terres mayas), *Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 111-112, pp. 109-115.

MICHELET, D., ARNAULD, M.-C., NONDEDEO, P., TALADOIRE, É., DZUL, S., ANDRIEU, C., … LATSANOPOULOS, N., (2007), *Proyecto Rio Bec (Campeche, México). Informe de la quinta*

temporada del 5 de febrero al 4 de mayo de 2006. 328 p.

MICHELET, D., NONDÉDÉO, P. & ARNAULD, C., (2005), Río Bec, ¿Una Excepción?, *Arqueología Mexicana*, vol. 75, pp. 58-63.

MICHELET, D., NONDEDEO, P., DZUL, S., PATROIS, J., GILLOT, C., PEREIRA, G., … FORNÉ, M., (2009), *Proyecto Río Bec (Campeche México). Informe de la séptima temporada, del 19 de febrero al 5 de mayo de 2008*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 350 p.

MICHELET, D., NONDÉDÉO, P., PATROIS, J., GILLOT, C. & GONZÁLEZ GOMEZ, E., (2013), Structure 5N2 (Group « A »): A Rio Bec paradigmatic palace?, *Ancient Mesoamerica*, vol. 24, n°2, pp. 415-431.

MICHELET, D., TALADOIRE, É., DZUL, S., ANDRIEU, C., NONDEDEO, P., PATROIS, J., … LATSANOPOULOS, N., (2006), *Proyecto Río Bec (Campeche México). Informe de la cuarta temporada, del 8 de febrero al 6 de mayo de 2005, CNRS, laboratorio " Archéologie des Amériques " (UMR 8096)*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 329 p.

MICHELET, D., TALADOIRE, É., DZUL, S., NONDEDEO, P., PATROIS, J., ARNAULD, M.-C., … VANNIÈRE, B., (2004), *Proyecto Río Bec (Campeche México). Informe de la segunda temporada, del 27 de febrero al 25 de mayo de 2003, CNRS, laboratorio " Archéologie des Amériques " (UMR 8096)*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 210 p.

MICHELET, D., TALADOIRE, É., DZUL, S., NONDEDEO, P., PATROIS, J., MARCHAND, G., … ANDRIEU, C., (2005), *Proyecto Río Bec (Campeche México). Informe de la tercera temporada, del 16 de febrero al 15 de mayo de 2004, CNRS, laboratorio " Archéologie des Amériques " (UMR 8096)*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 266 p.

MILLER, A. Z., DIONÍSIO, A., LAIZ, L., MACEDO, M. F. & SAIZ-JIMENEZ, C., (2009), The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms, *Annals of microbiology*, vol. 59, n°4, pp. 705–713.

MILLER, A. Z., SANMARTÍN, P., PEREIRA-PARDO, L., DIONÍSIO, A., SAIZ-JIMENEZ, C., MACEDO, M. F. & PRIETO, B., (2012), Bioreceptivity of building stones: a review., *The Science of the total environment*, vol. 426, pp. 1-12.

MISHRA, A. K., JAIN, K. K. & GARG, K. L., (1995), Role of higher plants in the deterioration of historic buildings, *Science of The Total Environment*, vol. 167, n°1-3, p. 375-392.MONOD, T., (1997), *Le chercheur d'absolu*, Gallimard, Paris, 261 p.

MONTANA, G., RANDAZZO, L., ODDO, I. A. & VALENZA, M., (2008), The growth of '' black crusts '' on calcareous building stones in Palermo (Sicily): a first appraisal of anthropogenic and natural sulphur sources, *Environmental Geology*, vol. 56, n°56, pp. 367-380.

MOTTERSHEAD, D. N., (2000), Identification and mapping of rock weathering surface forms and features, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, vol. 120, pp. 5-22.

NEBOIT, R., (1991), *L'Homme et l'érosion*, Presses Universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 226 p.

NONDÉDÉO, P. & DZUL, S., (2010), Arquitectura y cronología: hacia un esquema preliminar de evolución de la occupación en la microregión de Río Bec, dans : BENAVIDES, A. et VARGAS PACHECO, E. (éds.), *La peninsula de Yucatán: investigaciones recientes y*

cronologías alternativas, Universidad Autonoma de Campeche, CampecheCollección, pp. 91-120.

NONDÉDÉO, P., MICHELET, D., ARNAULD, M.-C., TALADOIRE, É., PATROIS, J. & BARROIS, R., (2002), *Proyecto Río Bec (Campeche México). Informe de la primera temporada, del 15 de febrero al 18 de mayo de 2002, CNRS, laboratorio " Archéologie des Amériques " (UMR 8096)*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 58 p.

NONDÉDÉO, P., PATROIS, J., LACADENA, A., ARNAULD, C., TALADOIRE, É. & MICHELET, D., (2010), De la autonomia politica y cultural de la provincia de Rio Bec, *Estudios de Cultura Maya*, vol. XXXVI, pp. 39-66.

O'BRIEN, P. F., BELL, E., ORR, T. L. L. & COOPER, T. P., (1995), Stone loss rates at sites around Europe, *Science of the Total Environment*, n°167, pp. 111-121.

OPALADE, O., (2016), Biogeography and Community Diversity of Epilithic Bacterial Assemblages on Monuments: Comparisons between Maya Sites, *Journal of Pollution Effects & Control*, vol. 4, n°4, pp. 176-181.

ORTEGA-CALVO, J. J., ARIÑO, X., HERNANDEZ-MARINE, M. & SAIZ-JIMENEZ, C., (1995), Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms, *Science of the Total Environment*, vol. 167, n°1-3, pp. 329-341.

ORTEGA-MORALES, B. O., GAYLARDE, C. C., ANAYA-HERNANDEZ, A., CHAN-BACAB, M. J., DE LA ROSA-GARCIA, S. C., ARANO-RECIO, D. & MONTERO-M, J., (2013), Orientation affects Trentepohlia-dominated biofilms on Mayan monuments of the Rio Bec style, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 84, pp. 351-356.

ORTEGA-MORALES, B. O., GAYLARDE, C. C., ENGLERT, G. E. & GAYLARDE, P. M., (2005), Analysis of Salt-Containing Biofilms on Limestone Buildings of the Mayan Culture at Edzna, Mexico, *Geomicrobiology Journal*, vol. 22, n°6, pp. 261-268.

ORTEGA-MORALES, B. O., GUEZENNEC, J., HERNANDEZ-DUQUE, G., GAYLARDE, C. C. & GAYLARDE, P. M., (2000), Phototrophic Biofilms on Ancient Mayan Buildings in Yucatan, Mexico, *Current Microbiology*, vol. 40, n°2, pp. 81-85.

ORTEGA-MORALES, B. O., NAKAMURA, S., MONTEJANO-ZURITA, G., CAMACHO-CHAB, J. C., QUINTANA, P. & DE LA ROSA-GARCIA, S. C., (2013), Implications of colonizing biofilms and microclimate on west stucco masks at North Acropolis, Tikal, Guatemala, *Heritage Science*, vol. 1, n°32, pp. 1-8.

ORTEGA-MORALES, B. O., NARVÁEZ-ZAPATA, J., REYES-ESTEBANEZ, M., QUINTANA, P., DE LA ROSA-GARCÍA, S. C., BULLEN, H., … CHAN-BACAB, M. J., (2016), Bioweathering Potential of Cultivable Fungi Associated with Semi-Arid Surface Microhabitats of Mayan Buildings, *Frontiers in Microbiology*, vol. 7, n°February, pp. 1-12.

PADILLA Y SANCHEZ, R. J., (2007), Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. LIX, n°1, pp. 19-42.

PARADISE, T. R., (2005), Petra revisited : an examination of sandstone weathering research in Petra , Jordan, *Geological Society Special Publication*, vol. 390, pp. 39-49.

PAVIA, S. & BOLTON, J., (2001), *Stone Monument Decay Study 2000: An Assessment of the Degree of Erosion*

and Degradation of a Sample of Stone Monuments in Ireland, Kilkenny.

PEÑA CASTILLO, A., BOUCHER, S. & CARRASCO, R., (1984), *Informe Primera Temporada 1984. Proyecto arqueológico Frontera Sur. Proyecto Chicana y Río Bec, Campeche*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 143 p.

PERIGNY, M. DE, (1908), Yucatan Inconnu, *Journal de la Société des Américanistes*, vol. 5, pp. 67-84.

PERRY, E., VELAZQUEZ-OLIMAN, G. & SOCKI, R. A., (2003), Hydrogeology of the Yucatán Peninsula, dans : S. FEDICK, M. ALLEN, J. JIMENEZ OSORNIO et A. GOMEZ POMPA (éd.), *The Lowland Maya Area*, CRC Press, pp. 115-138.

PIÑA CHAN, R., (1983), *Informe de exploraciones arqueológicas en Becan, Camp. 1982 – 1983*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 51 p.

PIÑA CHAN, R. & LANDA, G., (1983), *Informe sobre la exploración arqueológica del Edificio de las Tres Torres de Xpuhil, Camp., octubre de 1983*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 43 p.

PINNA, D., (2014), Biofilms and lichens on stone monuments : do they damage or protect ?, *Frontiers in microbiology*, vol. 5, pp. 1-3.

POPE, G. A., MEIERDING, T. C. & PARADISE, T. R., (2002), Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone, *Geomorphology*, vol. 47, n°2-4, pp. 211-225.

POPE, K. O., BAINES, K. H., OCAMPO, A. C. & IVANOV, B. A., (1994), Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinctions: Results of a Chicxulub asteroid impact model, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 128, n°3-4, pp. 719-725.

POTTER, D. F., (1977), *Maya Architecture of the Central Yucatan Peninsula, Mexico, MARI Publication*, New Orleans.

POTTER, D. F., (1974), Architectural style at Becan during the Maya Late Classic Period, dans : *National Geographic Society - Tulane University Research Program in Campeche : Preliminary reports on archaeological investigations in the Rio Bec area, Campeche, Mexico*, Middle American Research Institute Publication 31.

POTTER, D. F., (1973), *Maya Architectural Style in Central Yucatan*, Tulane University.

PRIKRYL, R. & SMITH, B. J., (2007), *Building Stone Decay : from Diagnosis to Conservation*, The Geological Society, London United Kingdom, 327 p.

QUIST, W. J., (2009), Replacement of natural stone in conservation of historic buildings :Evaluation of replacement of natural stone at the church of Our Lady in Breda, *Heron*, vol. 54, n°4, pp. 251-278.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C. & DOEHNE, E., (1999), Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, n°3, pp. 191-209.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C., HANSEN, E., SEBASTIAN, E. & GINELL, W. S., (1997), The Role of Clays in the Decay of Ancient Egyptian Limestone Sculptures, *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 36, n°2, pp. 151-163.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C., JROUNDI, F., SCHIRO, M., RUIZ-AGUDO, E. & GONZALEZ-MUÑOZ, M. T., (2012), Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: Implications for stone conservation, *Applied and Environmental Micro-*

biology, vol. 78, n°11, pp. 4017-4029.

ROTHERT, E., EGGERS, T., CASSAR, J., RUEDRICH, J., FITZNER, B. & SIEGESMUND, S., (2007), Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone, dans : R. PRYKRYL et B. J. SMITH (éds.), *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. Geological Society Special Publications*, The Geological Society of London, London, pp. 189-198.

RUPPERT, K. & DENISON, J. H., (1943), *Archaeological reconnaissance in Campeche, Quintana Roo and Peten*, Carnegie Institution of Washington Publication 543, Washington, D.C.

RUSKIN, J., (1849), *Les Sept Lampes de l'Architecture*, Paris, 264 p.

SAMSON GOMBERT, C., (1993), *Influences d'un environnement urbain et maritime sur les altérations d'un calcaire en oeuvre: la pierre de Caen*, Université de Caen. 298 p.

SAPPER, K., (1895a), Die unabhängigen Indianerstaaten von Yucatán, *Globus*, vol. 67, pp. 197-201.

SAPPER, K., (1895b), *The old Indian settlements and architectural structures in Northern Central America*, Annual report of the Smithsonian Institution, pp. 537-555.

SEBASTIAN, E., CULTRONE, G., BENAVENTE, D., LINARES, L., ELERT, K. & 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.

SELLIER, D., (1997), Utilisation des mégalithes comme marqueurs de la vitesse de l'érosion des granites en milieu tempéré : enseignements apportés par les alignements de Carnac (Morbihan), *Zeitschrift fur Geomorphologie*, vol. 41, pp. 319-356.

SELLIER, D., (1991), Analyse morphologique des marques de la météorisation des granites à partir de mégalithes morbihannais. L'exemple de l'alignement de Kerlescan à Carnac., *Revue Archéologique de l'Ouest*, vol. 12, pp. 21-41.

SEUFFERT, A., (1974), El templo B redescubierto en la zona de Río Bec, *Boletín del INAH*, vol. 2, n°8, pp. 3-18.

SMITH, B. J., (1996), Scale problems in the interpretation of urban stone decay, In : B. J. SMITH et P. A. WARKE (éds.), *Processes of urban stone decay*, Donhead Publishing, London, pp. 3-18.

SMITH, B. J., GOMEZ-HERAS, M., VILES, H. A. & CASSAR, J., (2010), *Limestone in the built environment : Present-day challenges for the preservation of the past*, The Geological Society, London United Kingdom, 252 p.

SMITH, B. J. & PRIKRYL, R., (2007), Diagnosing decay: the value of medical analogy in understanding the weathering of building stones, *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 271, n°1, pp. 1-8.

SMITH, B. J. & VILES, H. A., (2006), Rapid, catastrophic decay of building limestones: Thoughts on causes, effects and consequences, *Heritage, Weathering and Conservation*, pp. 191-197.

SMITH, B. J., WHALLEY, B. & MAGEE, R., (1992), Assessment of building stone decay: a geomorphological approach, In : R. G. M. WEBSTER (éd.), *Stone Cleaning and the Nature, Soiling and Decay Mechanisms of Stone*, Donhead Publishing Ltd., London, pp. 249-257.

SPRAJC, I., (1995), *Zona arqueológica de Becán, Campeche.*, Mexico DF.

STERFLINGER, K., (2010), Fungi: their role in deterioration of cultural heritage, *Fungal Biology Reviews*, vol. 24, n°1, pp. 47-55.

STRAULINO, L., (2012), El intemperismo de calizas en monumentos prehispánicos mayas . El caso de la cornisa del edificio 5N2 , Río Bec, *Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana*, vol. 64, n°1, pp. 49-60.

STRAULINO, L., SEDOV, S., MICHELET, D. & BALANZARIO, S., (2013), Weathering of carbonate materials in ancient Maya constructions (Río Bec and Dzibanché): Limestone and stucco deterioration patterns, *Quaternary International*, vol. 315, pp. 87-100.

SUÁREZ AGUILAR, V., OJEDA MAS, H., NAVARRO MARTÍNEZ, E. & SABIDO MÉNDEZ, M., (2009), *Informe de labores de mantenimiento efectuadas en las zonas arqueológicas de Becán y Chicanná, Campeche, temporada 2009*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 42 p.

TALADOIRE, É., (2014), Terrains de jeu et stèles dans la région maya de Río Bec : rejet ou inutilité ?, *Journal de la Société des Américanistes*, vol. 100, n°2, pp. 145-177.

TALADOIRE, É., (1995), Maurice de Périgny, archéologue ou explorateur ?, *Journal de la Société des Américanistes*, vol. 81, pp. 243-252.

TALADOIRE, É., DZUL, S., NONDEDEO, P. & FORNE, M., (2013), Chronology of the Rio Bec Settlement and Architecture, *Ancient Mesoamerica*, vol. 24, n°2, pp. 353-372.

TESSON, S., (2017), *Une très légère oscillation*, Équateurs, Paris, 230 p.

THOMAS, P., (1973), *Informe Settlement Pattern Survey at Becan, Campeche,1973*, Archivo Técnico del INAH. Mexico DF. 248 p.

THOMAS, P. & CAMPBELL, J., (2008), Excavations at Rio Bec Group B, structure 6N1, Campeche, Mexico, *Estudios de Cultura Maya*, vol. XXXI, pp. 123-148.

TIANO, P., (2016), Biodeterioration of Stone Monuments: a Worldwide Issue, In : *The Open Conference Proceedings Journal*, pp. 29-38.

TÖRÖK, A., (2008), Black crusts on travertine : factors controlling development and stability, *Environmental Geology*, vol. 56, n°56, pp. 583-594.

TÖRÖK, A., 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, pp. 675-693.

TORRESCANO-VALLE, N. & FOLAN, W., (2015), Physical Settings, Environmental History with an Outlook on Global Change, In : *Biodiversity and Conservation of the Yucatan Peninsula*, Springer New York, New YorkSpringer, pp. 1-401.

TURKINGTON, A. V & PARADISE, T. R., (2005), Sandstone weathering: A century of research and innovation, *Geomorphology*, vol. 67, n°1-2 SPEC. ISS., pp. 229-253.

VAUTIER, F., VOLDOIRE, O. & DURACKA, N., (2008), L'apport de la stéréophotogrammétrie à l'étude de la dégradation des pierres monumentales, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, vol. 1, pp. 119-126.

VAUTIER, F. & VOLDOIRE, O., (2011), Comparaison lasergrammétrie / photogrammetrie pour la mesure de l ' erosion de pierres de façade. Abbatiale de Manglieu - Puy-de-Dôme, *Collection EDYTEM*, vol. 12, pp. 1-8.

VERHOEVEN, G., (2011), Software Review Taking Computer Vision Aloft - Archaeological Three-dimensional Re-

constructions from Aerial Photographs with PhotoScan, *Archaeological Proespection*, vol. 18, pp. 67-73.

VERRECCHIA, E. P. & VERRECCHIA, K. E., (1994), Needle-fiber calcite : a critical review and a proposed classification, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 64, n°3, p. 650-664.

VIDELA, H. A., (2001), Microbially induced corrosion : an overview, *International Biodeteriotation & Biodegradation*, vol. 48, pp. 176-201.

VIDELA, H. A., GUIAMET, P. S. & SARAVIA, S. G. DE, (2001), Biodeterioration of Mayan archaeological sites in the Yucatan Peninsula , Mexico, *International Biodeteriotation & Biodegradation*, vol. 46, n°2000, pp. 335-341.

VIDELA, H. A., GUIAMET, P. S. & GÓMEZ DE SARAVIA, S. G., (2003), Biodeterioro de materiales estructurales de sitios arqueológicos de la civilización maya, *Revista del Museo de La Plata*, vol. 44, pp. 1-11.

VILES, H., (2001), Scale issues in weathering studies, *Geomorphology*, vol. 41, n°1, pp. 63-72.

VILES, H., (1995), Ecological perspectives on rock surface weathering: Towards a conceptual model, *Geomorphology*, vol. 13, n°1-4, pp. 21-35.

VILES, H. A., (1990), The early stages of building stone decay in an urban environment, *Atmospheric Environment*, vol. 24, n°1, pp. 229-232.

VILES, H. A., (2005), Can stone decay be chaotic?, In : A. V TURKINGTON (éd.), *Stone decay in the architectural environment (Geological Society of America Special Paper 390)*, The Geological Society of America, Lexington, Kentucky, USA, pp. 11-16.

VILES, H. A., (2002), Implications of future climate change for stone deterioration, *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 205, n°1, pp. 407-418.

VIVO ESCOTO, J., (1964), Weather and climate of Mexico and Central America, In : R. WAUCHOPE (éd.), *Handbook of American Indians Vol.1*, University of Texas Press, Austin, pp. 187-215.

WARSCHEID, T. & BRAAMS, J., (2001), Biodeterioration of stone : a review, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 46, n°2000, pp. 343-368.

WEBSTER, A. & MAY, E., (2006), Bioremediation of weathered-building stone surfaces, *Trends in Biotechnology*, vol. 24, n°6, pp. 255-260.

WEDEKIND, W., (2005), Jordan, Petra, *Heritage at Risk*, pp. 151-156.

WEIDIE, A. ., (1976), Regional Geology of Yucatan Peninsula, dans : A. WEIDIE et W. WARD (éd.), *Carbonate Rocks and Hydrogeology of the Yucatan Peninsula, Mexico. Annual Convention of the AAPG-SEPM (1976)*, New Orleans Geological Society, New Orleans, pp. 2-17.

WILHELM, K., VILES, H., WINTER, E., BURKE, Ó., ENGELSTAEDTER, S. & COYTE, K. Z., (2017), Catastrophic Limestone Decay at the Central Sanctuary of Iupiter Dolichenus at Dülük Baba Tepesi in Southern Turkey: Causes and Implications for Future Conservation, *Conservation and Management of Archaeological Sites*, vol. 19, n°1, pp. 3-29.

WRIGHT, P. & TUCKER, M., (1991), Calcretes: An Introduction, In : P. WRIGHT et M. TUCKER (éds.), *Calcretes*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 1-22.

YAALON, D. H., (1988), Calcic horizon and calcrete in acidic soils and paleosols: progress in the last twenty two years, *Soil Science Society of American Agronomy Abstracts*.

YOUNG, M. E., BALL, J. W. & LAING, R. A., (2000), Quantification of the Decay Rates of Cleaned and Soiled Building Sandstones, In : B. J. SMITH et A. V. TURKINGTON (éds.), *Stone decay its causes and controls*, Donhead Publishing, London, pp. 15-32.

ZHOU, J. & CHAFETZ, H. S., (2009), Biogenic caliches in Texas: The role of organisms and effect of climate, *Sedimentary Geology*, vol. 222, n°3-4, pp. 207-225.

Annexes

Annexe I : Observations en lames minces des matériaux du secteur Río Bec 351

Annexe II : Projet de recherche présenté à l'INAH en janvier 2013 363

Annexe I : Observations en lames minces des matériaux du secteur Río Bec

Légende des fiches d'observation en lames minces :

BEC-01

(a) Vue d'ensemble de la structure laminaire de l'échantillon avec alternance de niveaux dolosparitiques et de zones de pure micrite (lumière naturelle) ;
(b) Zone de pure micrite [Mi] avec porosité cavitaire inter-particules (lumière polarisée) ;
(c) Fissure en cours de dolomitisation [FD] et oncolithes en cours d'évidement, insérés dans la matrice de la roche (lumière polarisée) ;
(d) Idem (c) en lumière naturelle ;
(e) Trames de dolosparite bien cristallisée [TD], insérée dans une matrice alternant niveaux micritiques [Mi] et dolosparitiques [DS] (lumière naturelle) ;
(f) Niveau dolosparitique bien cristallisé [DS] (lumière polarisée).

BEC-06

(a) Vue d'ensemble de la structure en mosaïque avec alternance de niveaux micritiques [Mi] et microsparitiques [MS] (lumière naturelle) ;
(b) Idem (a), avec grains de calcite isolés [Ca] (lumière polarisée) ;
(c) Vue rapprochée de la structure observée en (a) et (b) avec grains de calcite altérés [Ca'] (lumière naturelle) ;
(d) Vue de l'interface roche-atmosphère en épifluorescence, montrant le front d'altération biologique [FAB] sur l'épiderme rocheux et à la périphérie d'un oncolithe évidé (épifluorescence, cube vert) ;
(e) Interface roche-atmosphère montrant la limite d'un cortex de détérioration mécanique [LCD] à la périphérie d'un oncolithe évidé [On] (lumière naturelle) ;
(f) Idem (e) en lumière polarisée.

BEC-10B

(a) Vue d'ensemble de la structure hétérogène de l'échantillon et d'une fissure le traversant en lumière naturelle ;
(b) Idem (a) en lumière polarisée ;
(c) Vue d'ensemble de la diversité des composants et de la porosité cavitaire en lumière naturelle ;
(d) Idem (c) en lumière polarisée ;
(e) Grain de dolomite [Do] en lumière polarisée ;
(f) Calcédoine [Cal] en lumière polarisée.

RB-01

(a) Vue d'ensemble de la structure à majorité micritique [Mi] de l'échantillon (lumière polarisée) ;
(b) Alternance de niveaux micritiques [Mi] et dolosparitiques [DS] (lumière polarisée) :
(c) Vue rapprochée de la texture micritique [Mi] en lumière polarisée ;
(d) Idem (c), en lumière naturelle, faisant apparaître la microporosité ;
(e) Vue rapprochée de la texture dolosparitique [DS] en lumière polarisée, avec des grains de dolomite ;
(f) Idem (e), en lumière naturelle, faisant apparaître des argiles [Arg].

RB-10

(a) Vue d'ensemble de la structure à majorité micritique [Mi] de l'échantillon (lumière polarisée) ;
(b) Idem (a) en lumière naturelle, montrant la microporosité [mI] dans la matrice micritique ainsi qu'un macropore [MP] ;
(c) Interface roche-atmosphère en lumière naturelle ;
(d) Idem (c) en lumière polarisée, montrant le biofilm [BF] inséré dans la porosité de surface ;
(e) Autre vue de l'interface roche-atmosphère, avec un biofilm épilithique [BF], et une transition de calcite bien cristallisée [Cal] avant un front de micritisation vers l'intérieur de la roche ;
(f) Idem (e), par épifluorescence, cube bleu.

XPU-01

(a) Vue d'ensemble de la structure de l'échantillon, avec un niveau micritique [Mi] inséré entre deux niveaux dolosparitiques [DS] (lumière polarisée) ;
(b) Idem (a) en lumière naturelle ;
(c) Trame de dessiccation [Tr] parcourant l'échantillon ;
(d) Macropore [MP] résultant de l'évidement d'un oncolithe (lumière polarisée)
(e) Oncolithe [On] en cours d'évidement à l'interface roche-atmosphère ;
(f) Niveau dolosparitique [DS] en lumière polarisée.

XPU-04

(a) Vue d'ensemble de la structure laminaire de l'échantillon (lumière polarisée) ;
(b) Autre vue d'ensemble de la structure de l'échantillon (lumière polarisée) ;
(c) Oncolithe partiellement évidé [On] (lumière polarisée) ;
(d) Cyanobactéries [Cya] à l'intérieur de l'oncolithe (lumière naturelle) ;
(e) Macropore [MP] proche de l'interface roche-atmosphère (lumière polarisée) ;

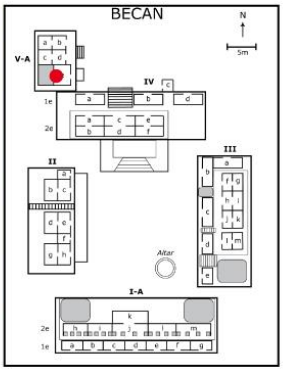
(f) Trames de dessiccation en cours de dolomitisation [Tr] (lumière polarisée).

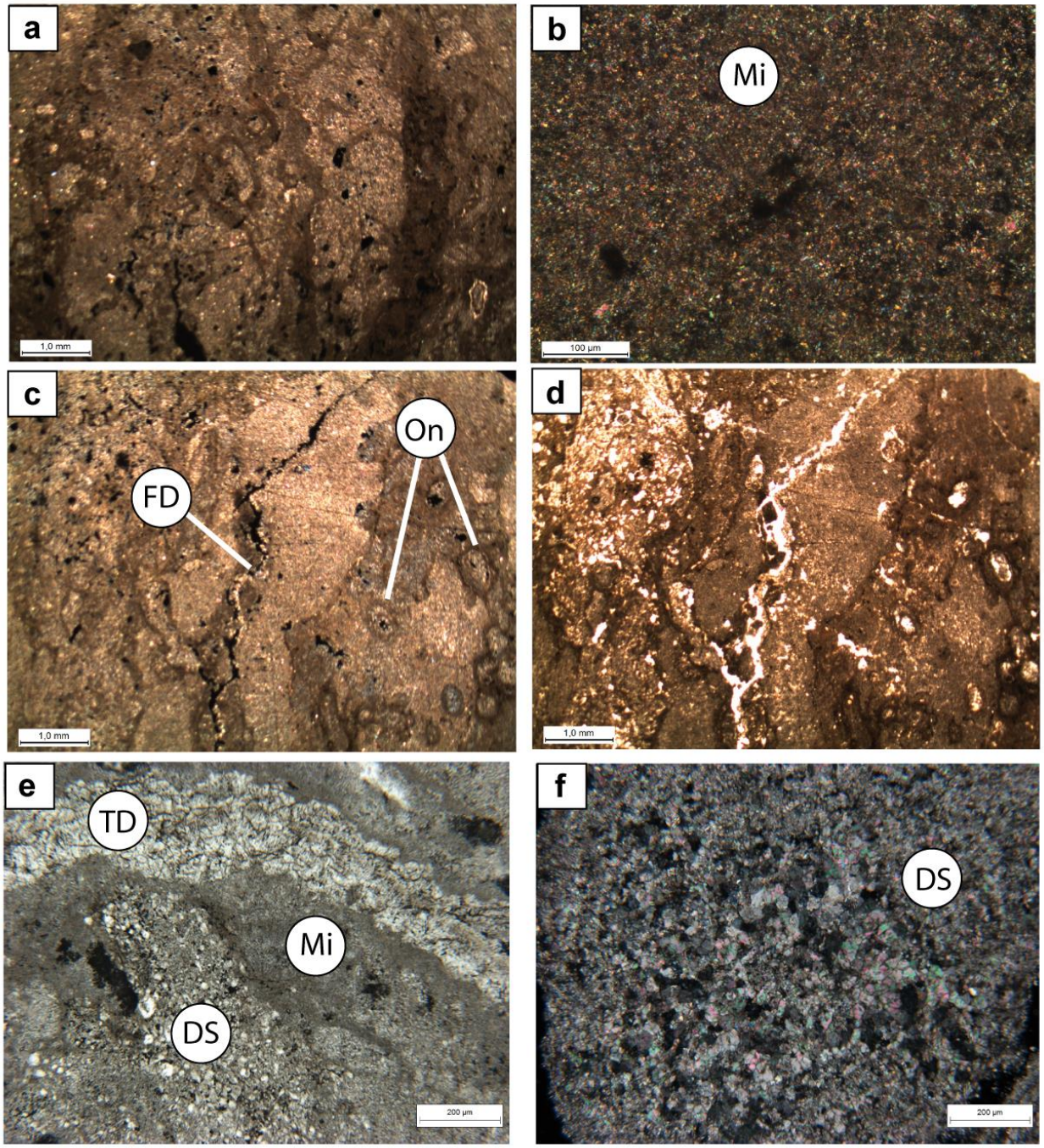
XPU-06

(a) Vue d'ensemble de la structure oncolithique avec des agrégats [On] insérés dans une matrice micritique (lumière polarisée) ;
(b) Idem (a), avec porosité tubulaire à la périphérie des agrégats (lumière naturelle) ;
(c) Interface roche-atmosphère avec macropores [MP] (lumière naturelle) ;
(d) Idem (c) en lumière polarisée, avec micrite en cours de dissolution [MiD] favorisant la chute des oncolithes (lumière polarisée) ;
(e) Nano-aiguilles de calcite [NaC] correspondant à une recristallisation sondaire dans les fissures et les trames de détérioration mécanique (lumière polarisée) ;
(f) Idem (e) en lumière naturelle.

BEC-01

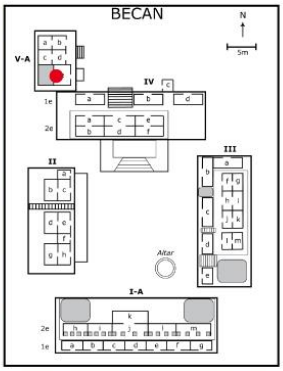
Site : Becán
Structure : V-A

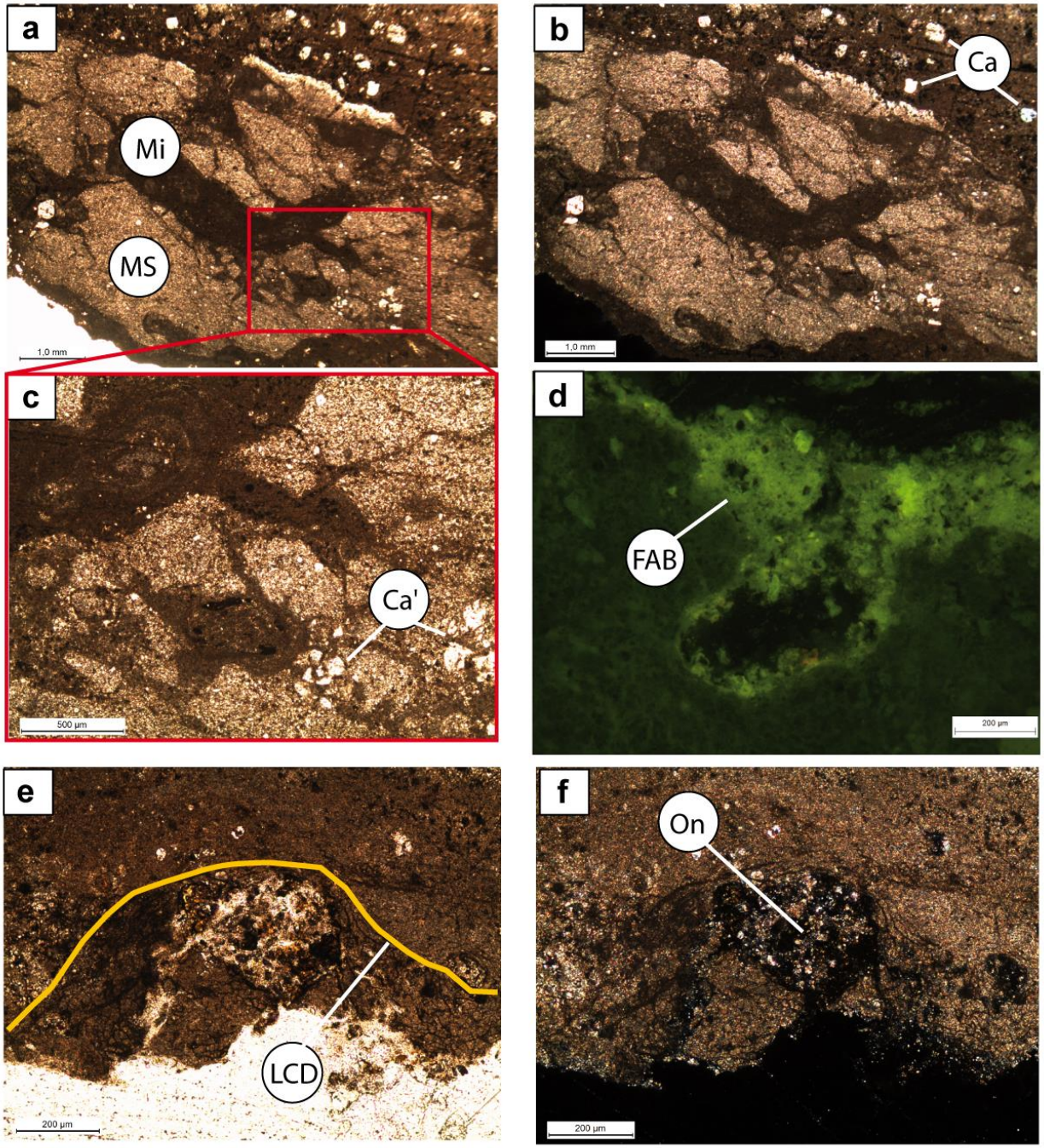




BEC-06

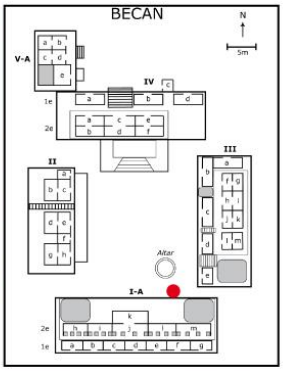
Site : Becán
Structure : V-A

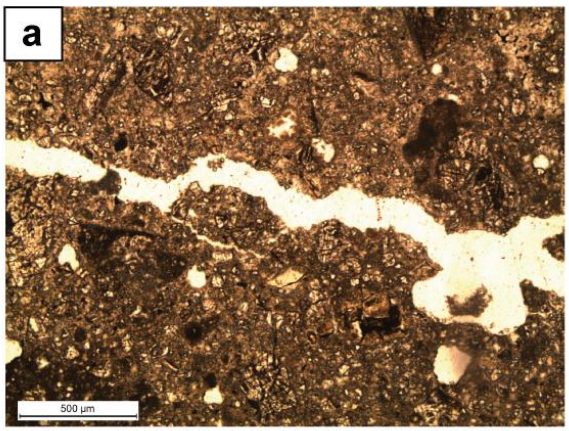


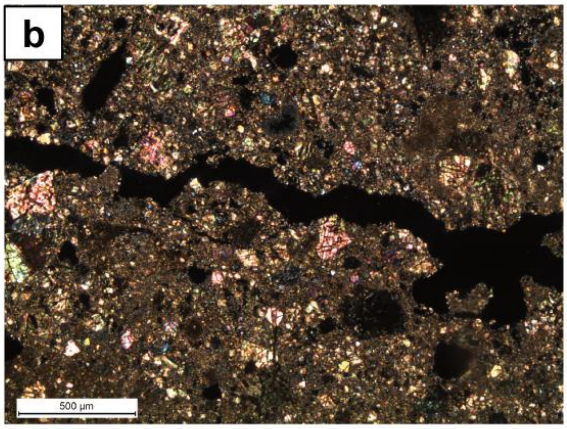


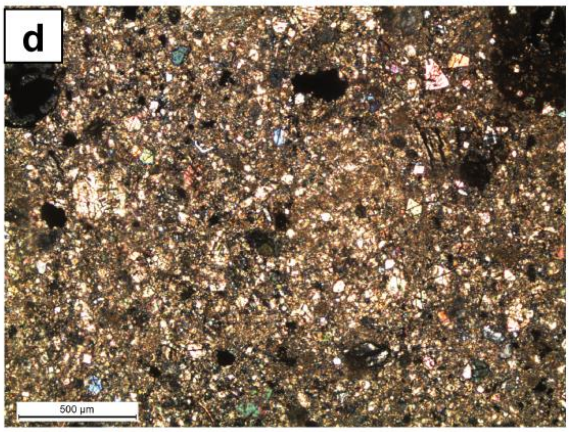
BEC-10B

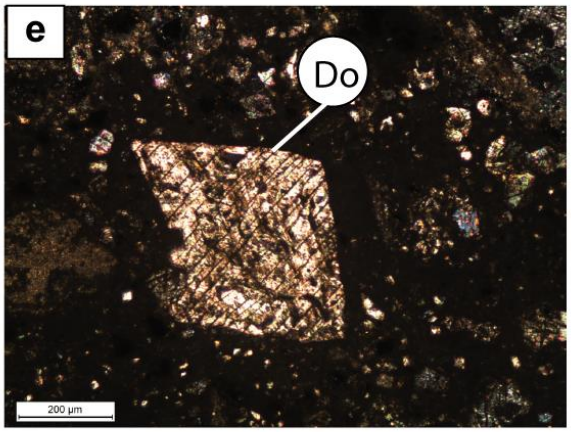
Site : Becán
Structure : I-A

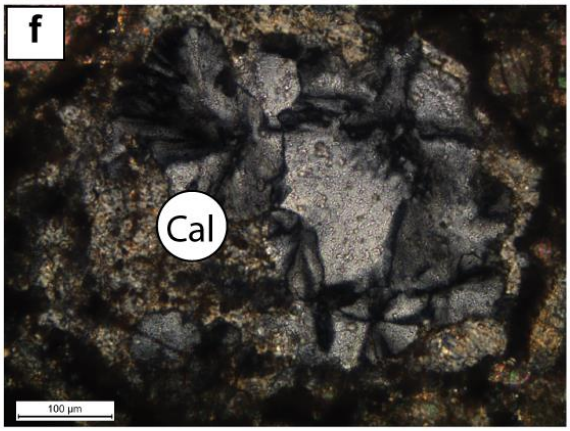






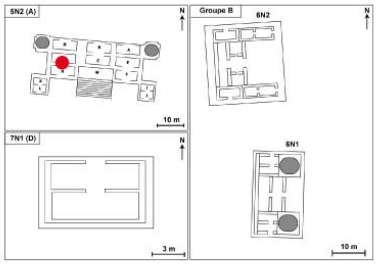


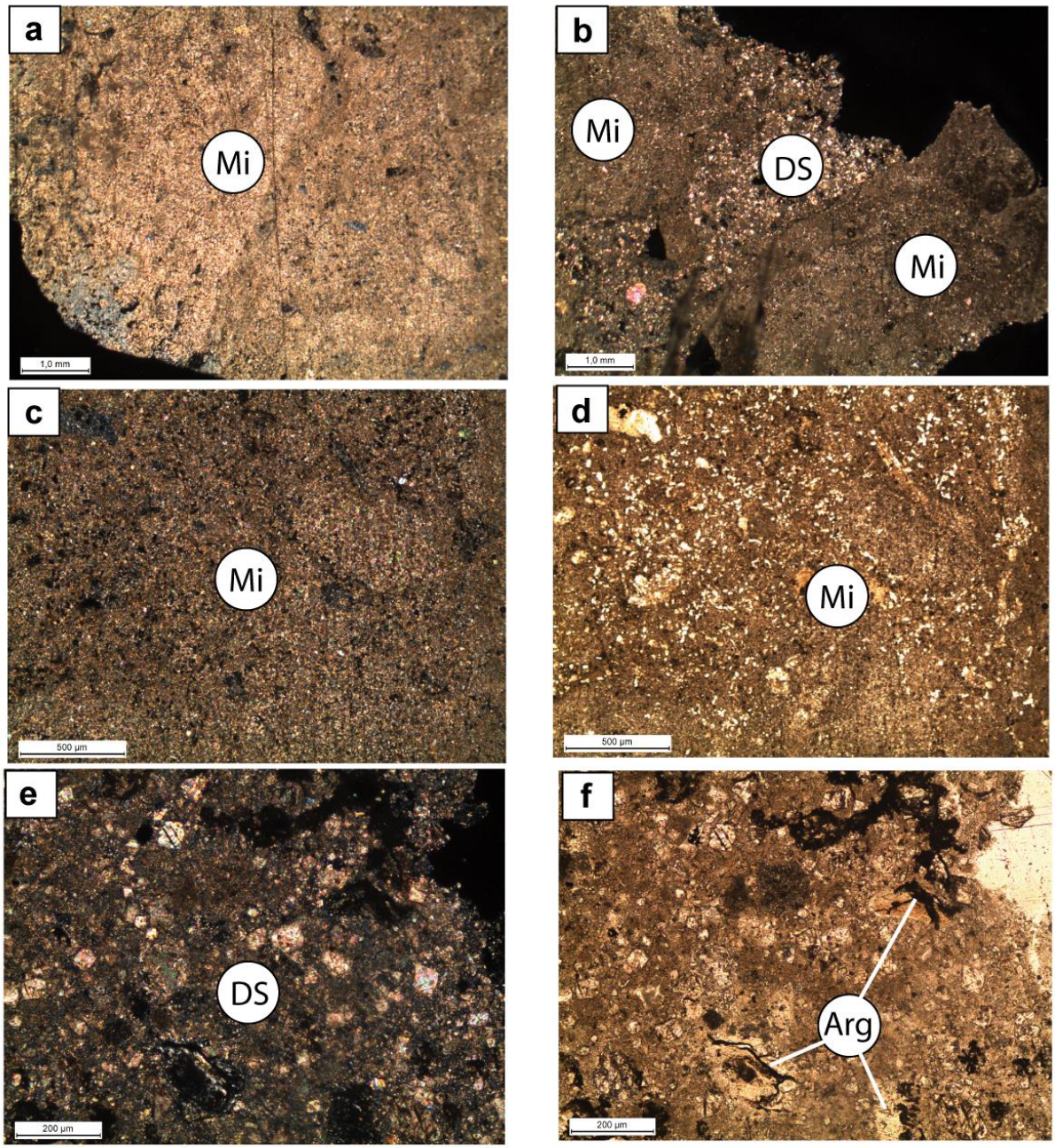




RB-01

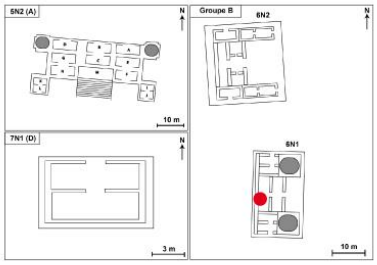
Site : Río Bec
Structure : 5N2

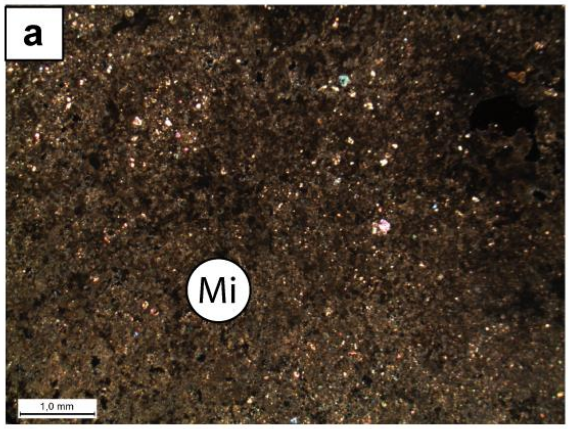


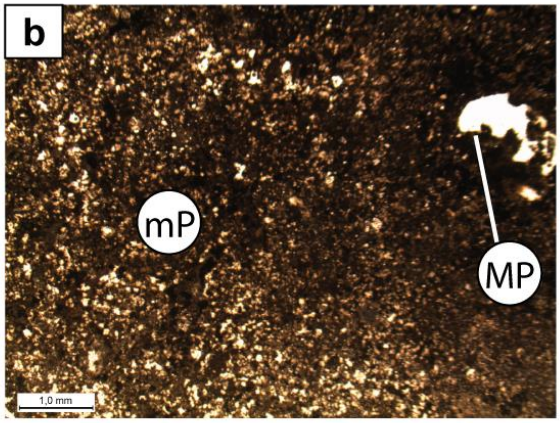


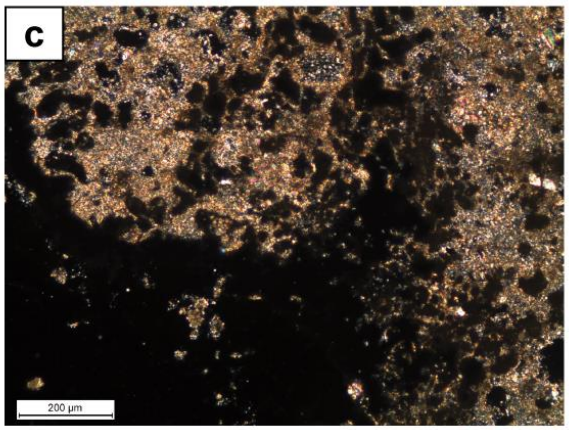
RB-10

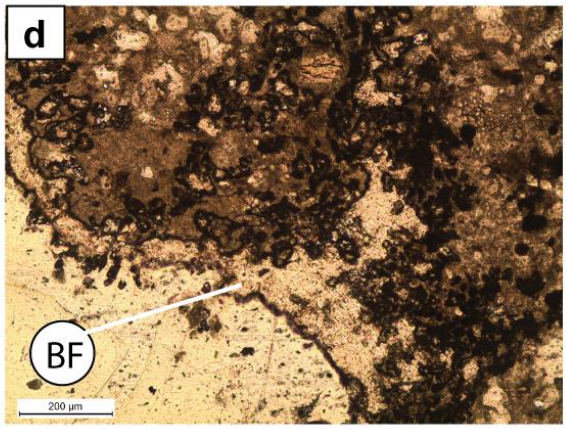
Site : Río Bec
Structure : 5N2

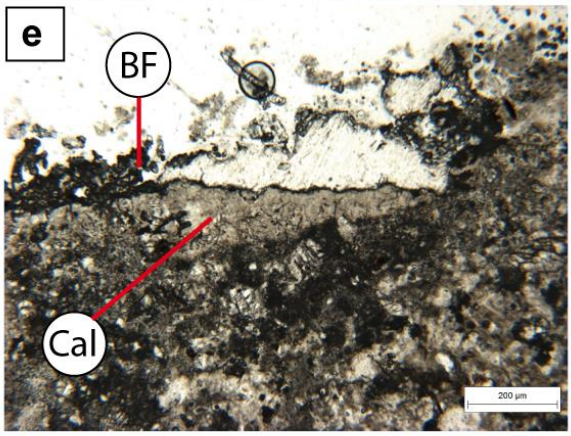


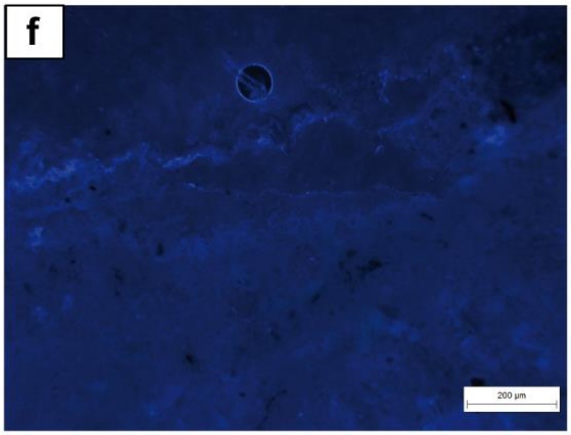






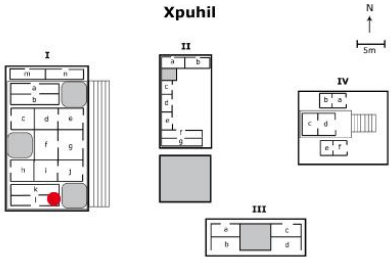


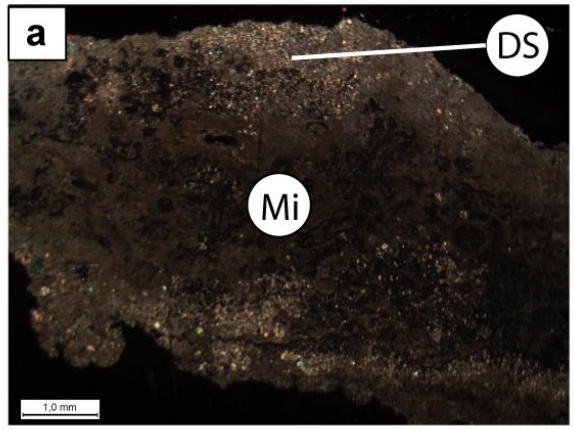


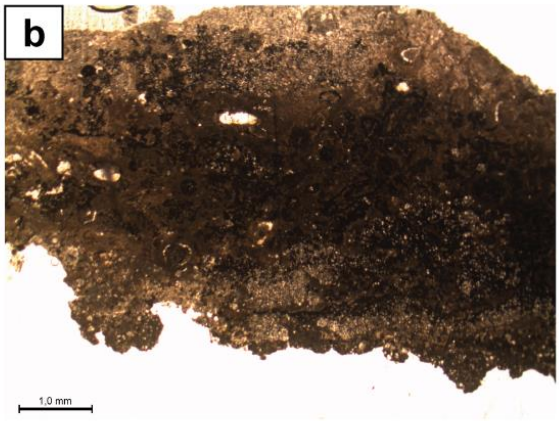


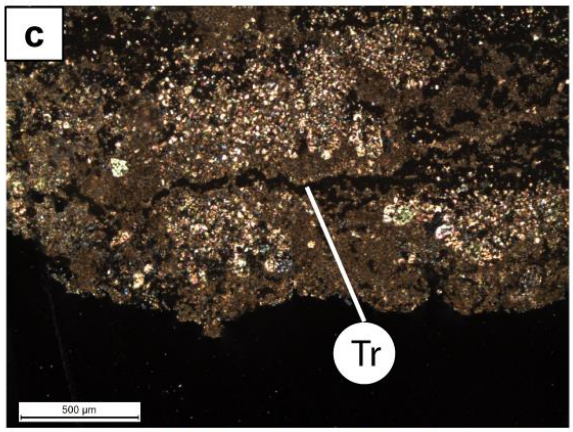
XPU-01

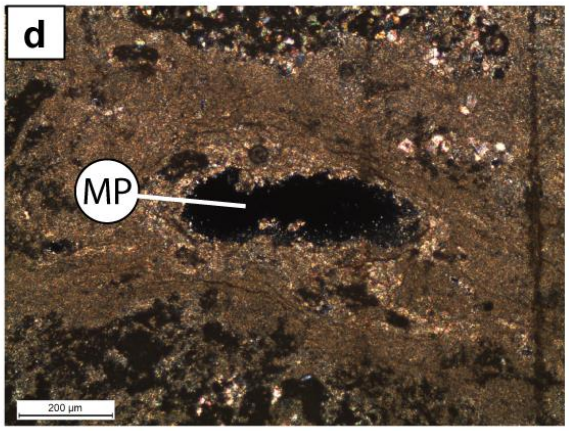
Site : Xpuhil
Structure : I

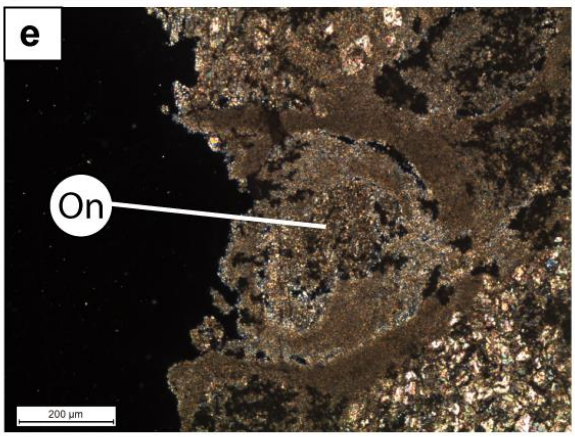


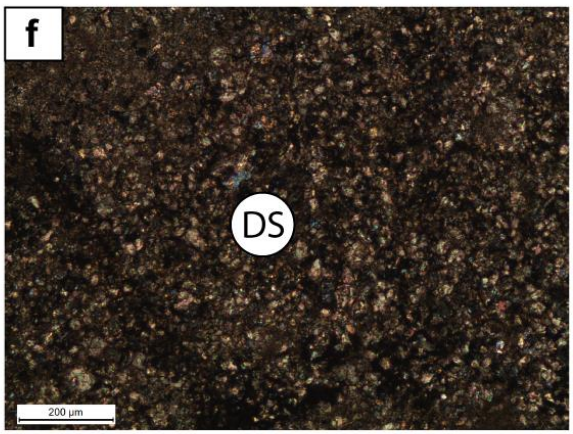






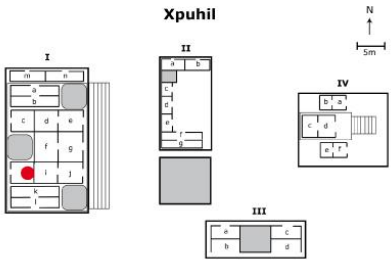


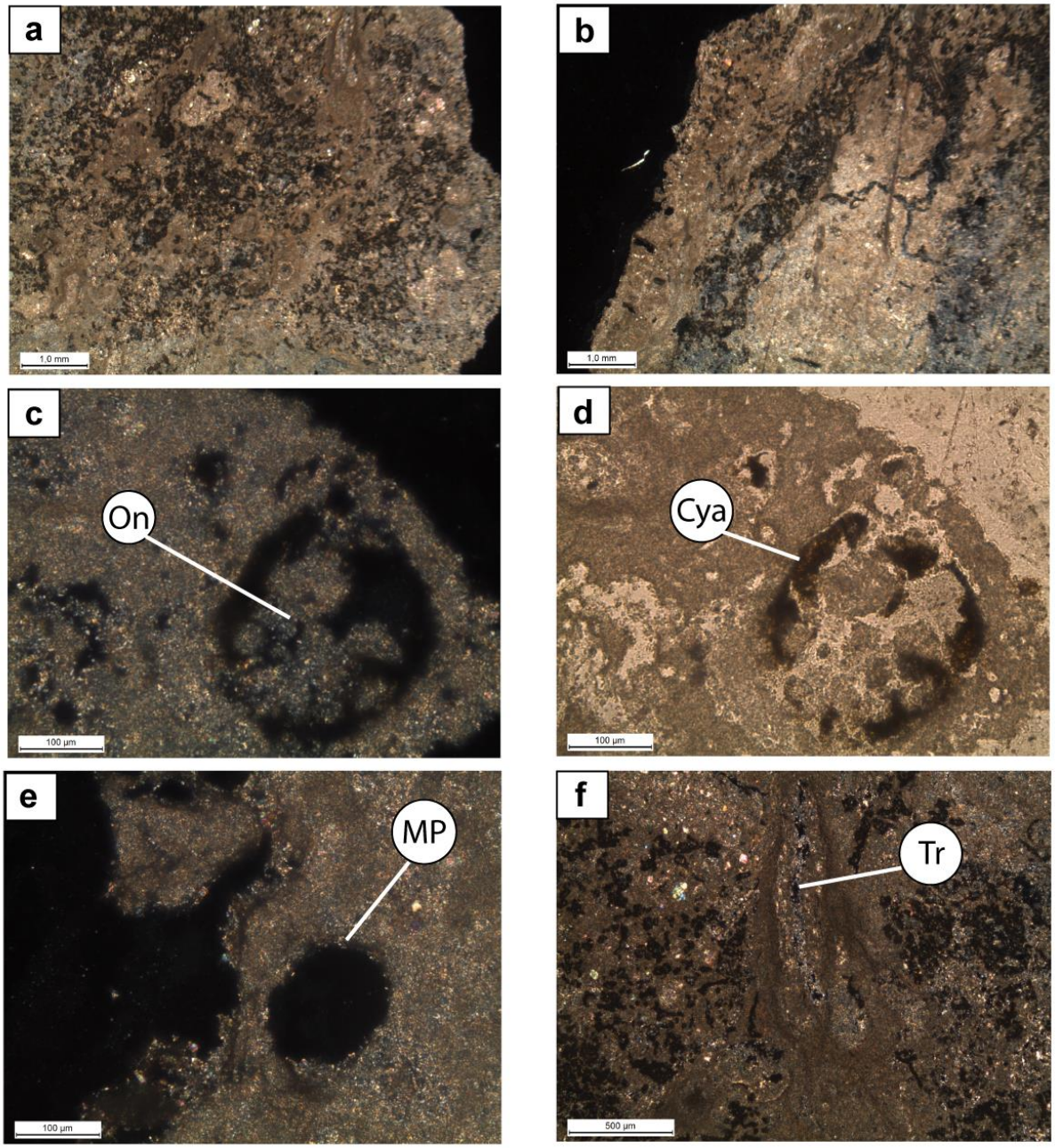




XPU-04

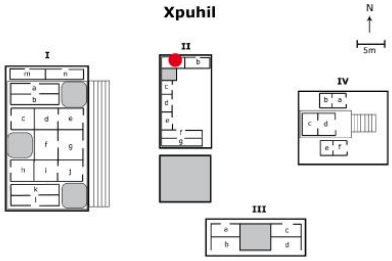
Site : Xpuhil
Structure : I

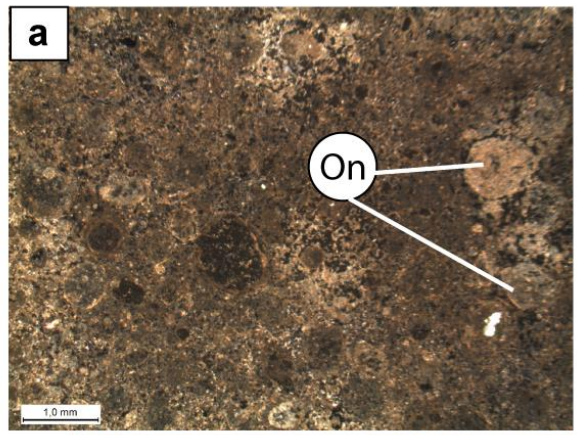


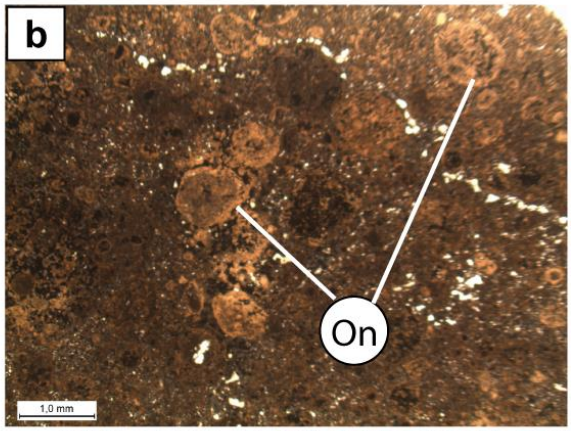


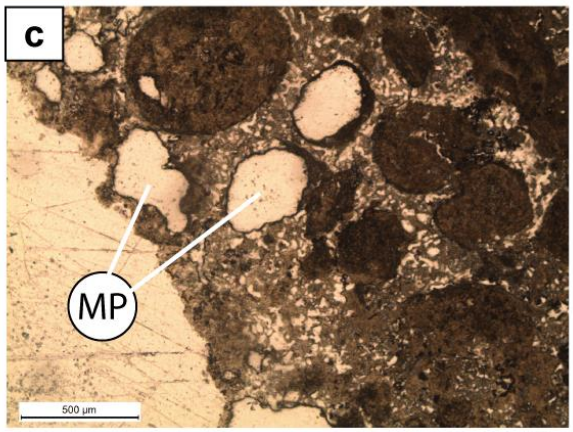
XPU-06

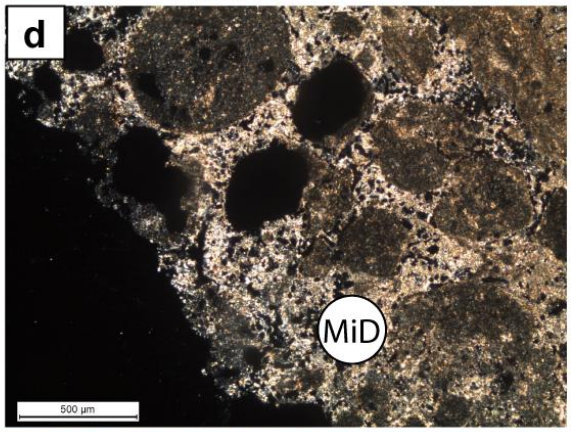
Site : Xpuhil
Structure : II

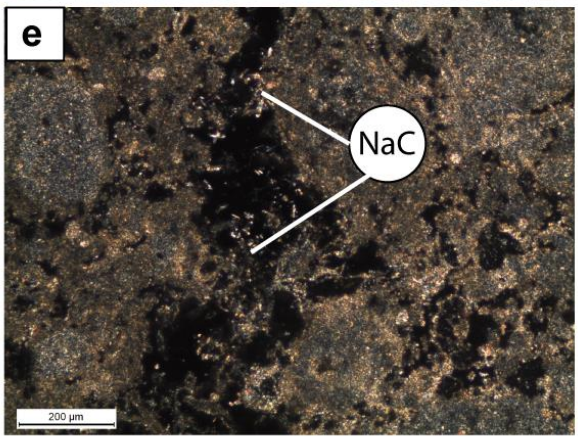


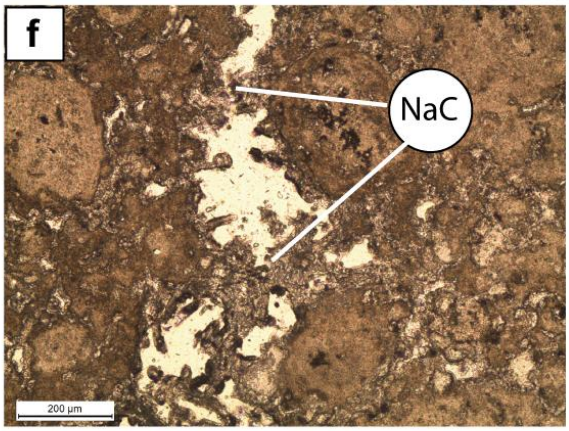












Proyecto "Deterioro de las piedras mayas"

Un enfoque geomorfológico del deterioro de la piedra caliza en Yucatán

Propuesta de trabajo para el primer semestre del 2013

Marie-Françoise André

Profesora de Geomorfología – Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand
Miembro del Institut Universitaire de France

Paul-Edgard Genet

Estudiante de Doctorado en Geomorfología – Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand

UMR 6042 "GEOLAB", CNRS–Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand 2,
Laboratoire de géographie physique et environnementale

Con la colaboración del UMR 8096 « ArchAm » CNRS–Université de Paris 1
y del Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA)
Embajada de Francia en México

Índice

Introducción 4

1. **Contexto y propuestas científicas** 5

1.1. Problemática general 5

1.2. Trabajos anteriores del equipo de investigación sobre el deterioro de la piedra monumental 7

1.2.1. Presentación del laboratorio Geolab 7

1.2.2. Estudios anteriores sobre las iglesias romanas de Auvergne y los templos de Angkor en Camboya 8

1.3. Propuestas de un programa en Yucatán y principales resultados de la misión exploratoria de febrero 2012 10

1.3.1. Justificación del interés por los sitios arqueológicos mayas de Yucatán 11

1.3.2. Principales enseñanzas de la visita preliminar de febrero 2012 11

1.3.3. Extensión del corpus de sitios por estudiar a la región de Río Bec 13

2. **Actividades de investigación previstas en 2013** 14

2.1. Sitios de estudio, itinerario y calendario de campaña 14

2.2. Descripción de las actividades 15

2.2.1. Actividad 1: Organización de las colaboraciones e investigación documentaria 15

2.2.2. Actividad 2: Registros en el campo 15

2.2.3. Actividad 3: Extracción de muestras 19

2.2.4. Actividad 4: Análisis de laboratorio 19

2.3. Presupuesto provisional 19

Referencias 20

Curriculum vitae de los participantes 23

Introducción

Esta propuesta surge de un equipo francés de geomorfología (laboratoire Geolab, UMR 6042, CNRS – Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand), como continuación de trabajos anteriores sobre sitios patrimoniales de Europa y Asia, especialmente los templos khmer de Angkor. El proyecto se basa en un corpus de edificios mayas de Río Bec y de la ruta Puuc con tres objetivos: 1) entender los mecanismos del deterioro de la piedra caliza monumental, 2) cuantificar el deterioro provocado por la liberación de las estructuras arqueológicas y por su exposición directa a la agresividad climática, y 3) contribuir a la reflexión que existe en México sobre la búsqueda de nuevas estrategias y nuevos procesos de conservación de la piedra monumental. Este trabajo de investigación será llevado a cabo en un marco interdisciplinario asociando las arqueociencias, las ciencias de la conservación, las geociencias y las biociencias.

El proyecto que proponemos se asocia con la tesis doctoral de Paul-Edgard Genet, quien tiene un contrato doctoral desde 2012 hasta 2015. También se inscribe en el programa "Approche géoarchéologique intégrée de la dégradation de la pierre monumentale" ("Enfoque geoarqueológico integrado del deterioro de la piedra monumental"), coordinado por Marie-Françoise André, profesora de Geomorfología de la Université Blaise Pascal, y financiado por el Institut Universitaire de France. El trabajo será llevado a cabo en cooperación con investigadores de México D.F. y de Campeche, así como del equipo del laboratorio ArchAm, dirigido por Dominique Michelet y Philippe Nondedeo y con el respaldo del Centro francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos de México (CEMCA) dirigido por la doctora Delphine Mercier.

Esta propuesta presenta las actividades para el primer semestre del año 2013 y en particular el trabajo a realizarse en México del 20 de febrero al 20 de marzo. Durante este mes, se establecerán contactos con las autoridades mexicanas y se pondrán en marcha colaboraciones científicas con investigadores mexicanos. Una campaña de campo será efectuada en el sector de Río Bec (M-F. André y P-E. Genet), en colaboración con D. Michelet y su equipo, con una extensión sobre la ruta Puuc y Chichen Itzá (P-E. Genet). Los principales sitios concernidos son: los grupos de la micro-región de Río Bec, Chicanná, Hormiguero, Becan. La extensión concernirá Chunhuhub, Xculoc, Xcalumkín, Uxmal, Kabáh, Labná, así como Chichén Itzá. Las operaciones consideradas serán detalladas en la segunda parte de esta propuesta.

1. Contexto y propuestas científicas

1.1. Problemática general

El periodo reciente se ha destacado por el crecimiento de una dinámica científica interdisciplinaria que asocia los actores del patrimonio y los científicos de las disciplinas de arqueociencias, geociencias y biociencias con un objetivo doble:

1) Entender las razones de la aceleración del deterioro de la piedra monumental que se puede observar desde algunos decenios en varios sitios patrimoniales;

2) Evaluar y mejorar las estrategias y los procesos de conservación.

En este contexto, la comunidad geomorfológica internacional especializada en el deterioro de la piedra se ha implicado en este tema de investigación, sobre todo durante los años 1990-2010 (Pope et al. 2002). El enfoque naturalista y especializado de estos científicos los pone en una posición central y decisiva, entre las arqueociencias y las ciencias de la conservación por una parte, las geociencias y las biociencias por otra (Fig.1). Los geomorfológos han intervenido con la colaboración de científicos de otros campos disciplinarios –especialmente arqueólogos, conservadores y biólogos– en varios sitios patrimoniales de alta diversidad, tales como:

- Los sitios megalíticos de Carnac en Francia (Sellier 1997)
- El sitio antiguo de Petra en Jordania (Paradise 2005)
- Los templos khmer en Camboya (André et al. 2006, 2011)
- Las iglesias medievales de Europa occidental (Robinson & Williams 1996)
- Las fortificaciones litorales británicas (Mottershead 2000)
- Las piedras de las tumbas en América del norte (Meierding 1993).

Varias observaciones efectuadas en estos sitios han permitido demostrar que la erosión lenta de la piedra monumental ha sido substituida desde hace un siglo por un deterioro acelerado que amenaza la conservación de los edificios. Al principio, la principal causa de agravación de este deterioro fue relacionada con la contaminación atmosférica (Brimblecombe, 2003), pero otros factores de control, relacionados con la intervención humana sobre los edificios y con su ubicación ambiental, han aparecido desde los años 1980:

- El impacto de la agresividad climática sobre la piedra provocado por la excavación de las estructuras arqueológicas de la selva, especialmente en los medios tropicales (Ortega-Morales et al. 2000, André et al. 2008).

- Los efectos aleatorios y destructivos de la introducción de materiales incompatibles durante las operaciones de restauración (Quist 2009, André et al. 2012a, Phalip et al. 2012).

- Los efectos nefastos de los procesos de limpieza demasiado abrasivos o corrosivos (Young et al. 2000).

- Los daños asociados a la excesiva frecuentación turística, especialmente en los sitios clasificados como Patrimonio de la Humanidad (Paradise 2005).

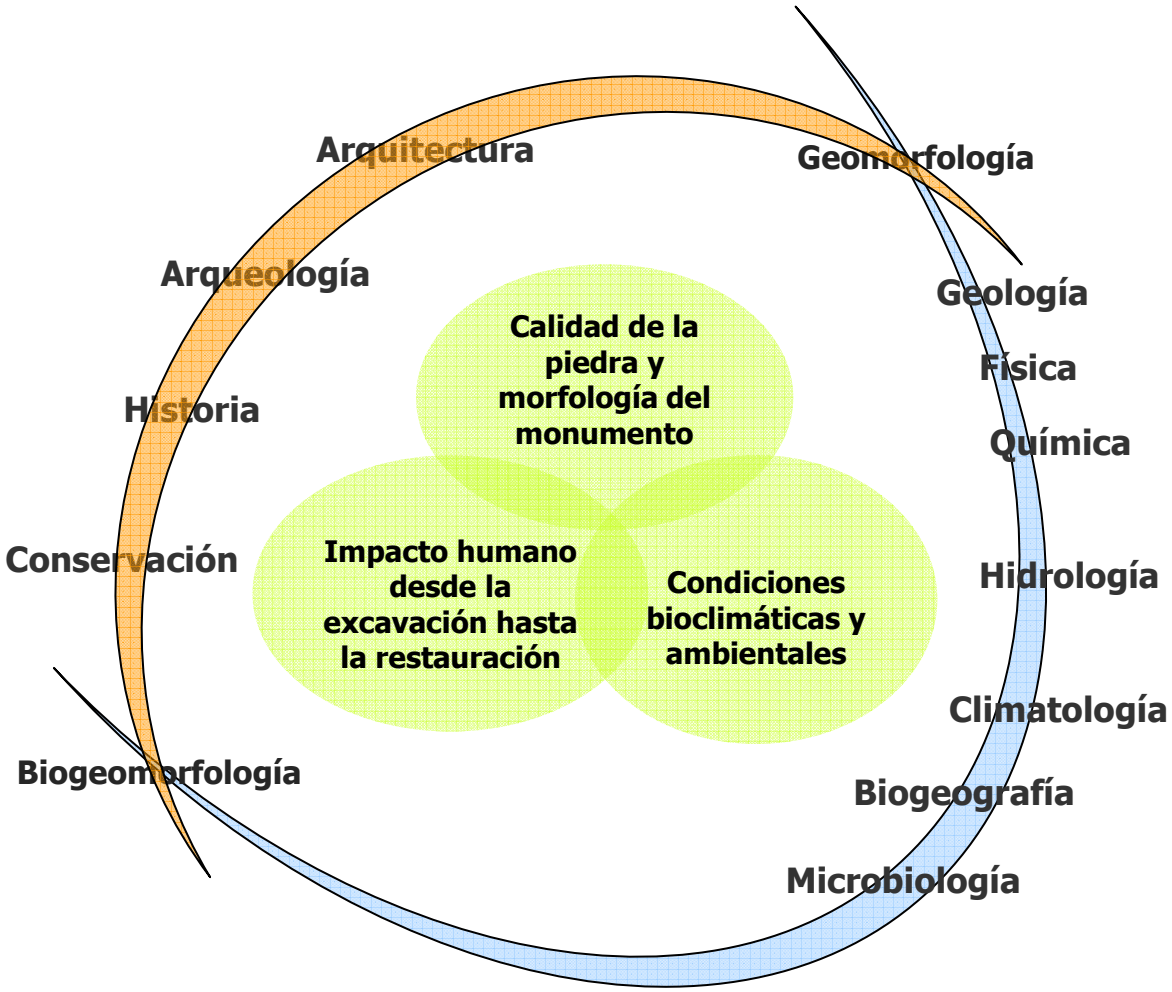


Figura 1. Campos disciplinarios asociados en el estudio del deterioro y de la conservación de la piedra monumental (André 2010).

En Mesoamérica se dedica una atención especial a los efectos de la colonización vegetal subsiguiente a la excavación de las estructuras de la selva, y especialmente a la acción destructiva *versus* protectora de los organismos colonizadores. En primer lugar, se enfatizó sobre el daño estético (ennegrecimiento de los edificios) y las amenazas sobre la integridad de las fachadas decorativas (biocorrosión) provocadas por las cianobacterias en Tikal, Uxmal y Kabáh (García de Miguel et al. 1995, Maldonado López et al. 1998, Ortega-Morales et al. 2000, Gaylarde et al. 2006, 2007). Luego, se progresó en la identificación y la caracterización de los microorganismos colonizadores (Ortega-Morales et al. 1999, 2004; Gaylarde & Gaylarde 2005, Ortega-Morales 2006a-b). Los trabajos más recientes consideran la

posibilidad de una bioprotección, o a lo menos de una bioestabilización de las fachadas excavadas, especialmente en algunos sitios de la región Río Bec (Ortega-Morales et al. 2012). Estos avances se reúnen con los conceptos de bioprotección y biomedicación recientemente desarrollados por Carter & Viles (2005) y por Webster & May (2006). La utilización de bacterias para curar las fachadas dañadas por cristalización de sales también se está implementando en algunos sitios mayas (Konkol et al. 2008).

El problema de la conservación de la piedra es particularmente importante en la región de Río Bec, a causa de la desintegración de la piedra caliza (Michelet 2007, 2008, 2009). Ello ha conducido al desarrollo de una tesis de licenciatura, en el marco de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración, y Museografía, con el objetivo de llevar a cabo y someter a prueba un proceso de conservación utilizando el fluoruro de sodio (Straulino 2010a-b). Dicha tesis fue galoneada por un premio del INAH.

En la actualidad, y a pesar de los progresos realizados durante los años pasados, subsisten varias cuestiones que requieren la constitución de una investigación interdisciplinaria que asocie arqueólogos, geomorfológos, biólogos, conservadores y restauradores. Las cuestiones actuales conciernen entre otros:

- La evaluación cuantitativa del impacto de las operaciones de excavación, conservación y limpieza sobre las piedras de paramento de las estructuras arqueológicas;
- El conocimiento de la combinación y de la alternancia de los procesos de deterioro mecánicos, químicos y biológicos, y la lógica de sus distribuciones espaciales;
- La identificación de los factores agravadores y aceleradores del deterioro;
- La evaluación cuantitativa del papel desempeñado por la calidad de la piedra caliza en la velocidad del deterioro;
- La evaluación del papel estabilizador o destructivo de los biopelículas colonizadoras.

1.2. Trabajos anteriores del equipo de investigación sobre el deterioro de la piedra monumental

1.2.1. Presentación del laboratorio Geolab

GEOLAB es un laboratorio de geografía física y ambiental dependiente de la Universidad de Clermont-Ferrand (Université Blaise Pascal Clermont 2) y del CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). Enfocado en las Ciencias Ambientales, el laboratorio depende del Institut Ecologie et Environnement del CNRS (INEE). El laboratorio congrega geomorfológos, hidrólogos y paleoecólogos. Uno de los equipos trabaja desde hace 12 años sobre los factores, procesos y velocidades de erosión de la piedra monumental. Estos trabajos han sido conducidos en 4 programas interdisciplinarios sucesivos coordinados por M-F

André, congregando geomorfológos, geólogos, biólogos, arqueólogos y conservadores del patrimonio:

1) **Impacto de la deforestación sobre la erosión de los templos de Angkor (2006-2013):** programa aprobado por el Comité International de Coordination pour la sauvegarde et le Développement du Site historique d'Angkor (UNESCO) – colaboraciones con la Ecole Française d'Extrême-Orient, el museo Guimet, y la autoridad nacional APSARA.

2) **Iglesias romanas de la región Auvergne (Francia): durabilidad del patrimonio medieval (2007-2010):** colaboraciones con el centro de historia "Espaces et Cultures", la autoridad Monuments Historiques, y las colectividades territoriales.

3) **TECHNE – Influencia de las técnicas de restauración y de obra de la piedra monumental sobre la durabilidad del patrimonio medieval (2009-2011):** colaboraciones con el centro de historia "Espaces et Cultures" y los Instituts de Physique du Globe de Clermont-Ferrand y Strasbourg.

4) **CITADEL – Conservación de los sitios fortificados de piedra caliza del patrimonio mundial (2012-2015):** programa interdisciplinario sometido a la MSH (Maison des Sciences de l'Homme – USR 3550 Clermont-Ferrand).

Desde 2010 y hasta 2015, estos programas son integrados a un programa marco financiado por el IUF (Institut Universitaire de France), que se intitula "Approche géoarchéologique intégrée de dégradation de la pierre monumentale" (Enfoque geoarqueológico integrado del deterioro de la piedra monumental).

1.2.2. Estudios anteriores sobre las iglesias romanas de Auvergne y los templos de Angkor en Camboya

Estos estudios han sido llevados a cabo en el marco de un enfoque pluri- e interdisciplinario que ha permitido entrecruzar informaciones y resultados sobre: 1) la geomorfología (categorización de las formas y procesos de deterioro, evaluación de las velocidades del retroceso de las piedra), 2) la geología (características petroquímicas y petrofísicas de los materiales de construcción y de restauración), 3) la arquitectura y la arqueología (fases y cronología de construcción de los edificios, de las operaciones de excavación y de restauración, uso de marcas lapidarias para definir las superficies de referencia) , y 4) la climatología (uso de captadores climáticos para discriminar las ambientes climáticos, selváticos y al aire libre).

La evaluación de la intensidad de deterioro ha sido efectuada cruzando enfoques cualitativos (escalas de deterioro químico y físico, Fig.2) y cuantitativos (fotogrametría, lasergrametría, análisis diacrónico basado en fotografías antiguas, Fig.3).

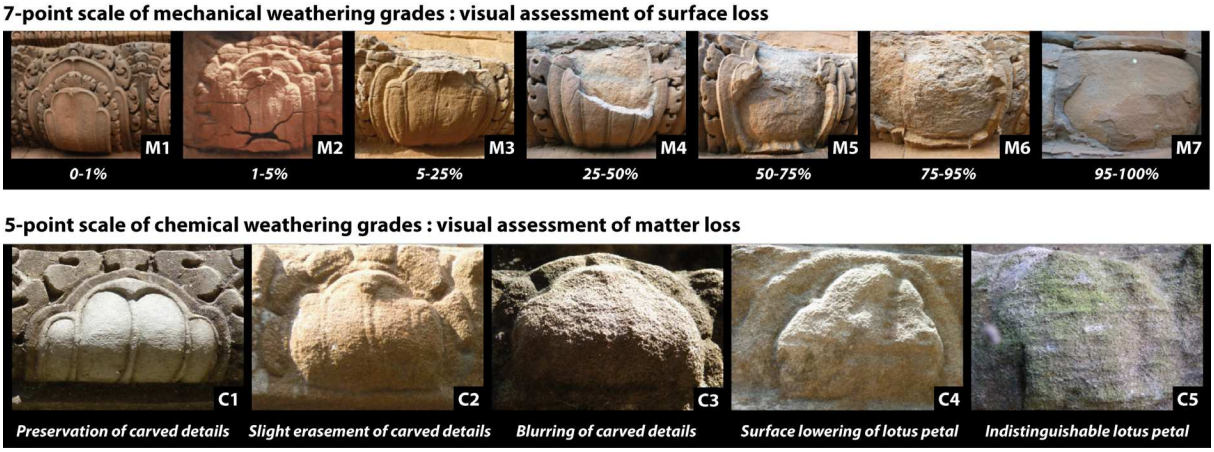


Figura 2: Escalas visuales de deterioro mecánico (arriba) y químico (abajo). (André et al. 2012).

Los principales avances científicos y metodológicos fueron:

1) **La demostración de la aceleración significativa de la velocidad de deterioro de las areniscas de Angkor, subsiguiente a la deforestación de la selva tropical en torno a los templos:** fragilizados químicamente bajo la selva, las areniscas han explotado mecánicamente una vez expuestas a la intemperie, especialmente debido a la insolación y las lluvias de monzón.

2) **La demostración de los efectos nefastos de las restauraciones de los siglos XIX y XX sobre los paramentos y esculturas de las iglesias romanas de Auvergne:** la introducción de juntas con cimento de Portland y la reestructuración en sobre-obra de algunos edificios con materiales incompatibles también han llevado a una aceleración de la velocidad de deterioro de las piedras de paramento (André et al. 2012a, Phalip et al. 2012).

3) **La creación de una escala de durabilidad de las areniscas de Angkor y la comprensión de su basamento geoquímico y petrofísico** (André et al. 2011).

4) **La demostración del papel protector desempeñado por la selva tropical,** moderando las fluctuaciones climáticas, **y de la extrema lentitud del deterioro bioquímico** operando sobre las biopelículas forestales en comparación con la velocidad del desgaste mecánico al aire libre (André et al. 2012b).

5) **La constitución de programas interdisciplinarios asociando geomorfológos y arqueólogos** (André & Phalip, 2010) **y la optimización de los métodos de especialización 3D de la erosión** (Vautier & Voldoire 2011).

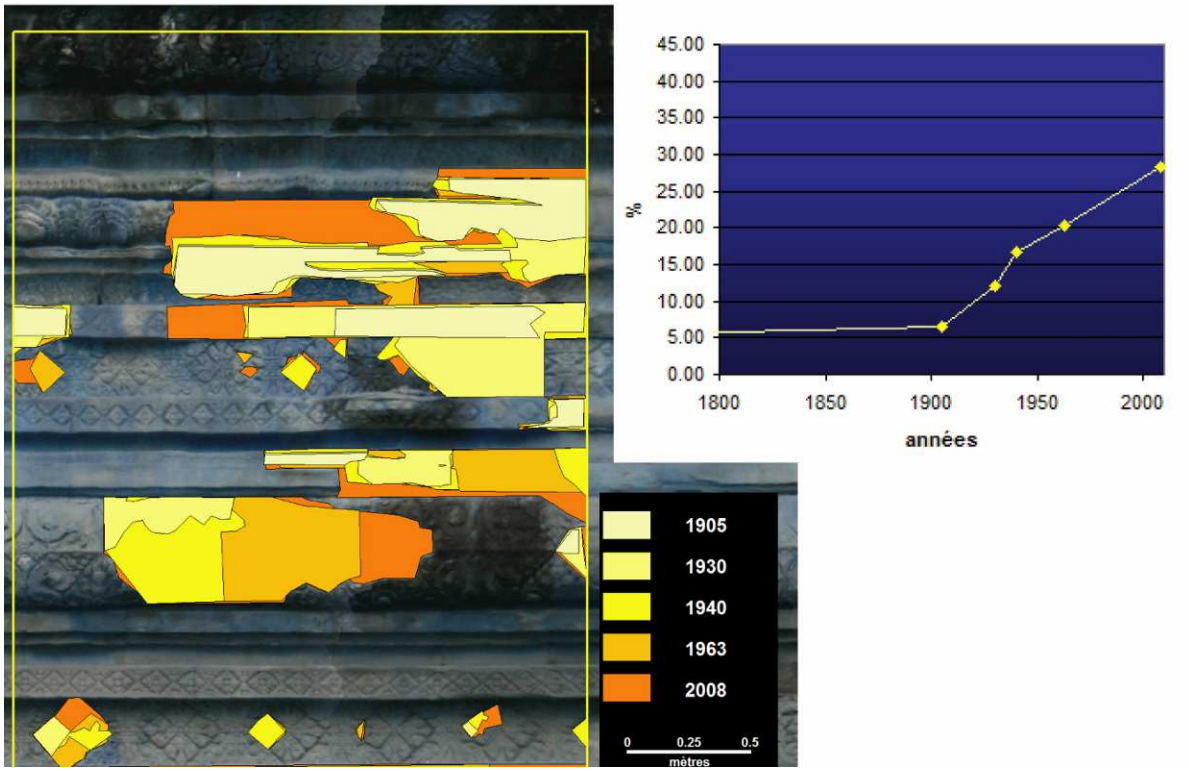


Figura 3: Apertura de cicatrices de erosión y aceleración del desgaste mecánico desde el despejo del templo de Ta Keo de la selva de Angkor al principio del siglo XX. (F.Vautier / Geolab).

Finalmente, se enfatizan las repercusiones de estos trabajos en las estrategias de conservación de los monumentos: 1) Participación del equipo en la redacción de la carta de Angkor e intervenciones en la UNESCO para la concientización de la autoridad APSARA (Agencia camboyana de gestión de los sitios de Angkor) sobre el papel protector de la selva tropical para el patrimonio monumental. 2) Implicación del equipo en la formación de los conservadores del patrimonio en el Sureste Asiático (Centre Regional de Formation aux Métiers du Patrimoine, financiado por el Ministère Français des Affaires Etrangères) y en Francia (Institut National du Patrimoine).

1.3. Propuestas de un programa en Yucatán y principales resultados de la misión exploratoria de febrero 2012

Esta propuesta se inscribe en la continuación de las investigaciones conducidas por nuestro equipo desde 12 años. La idea es extender la investigación realizada sobre los sitios de Angkor a algunos sitios arqueológicos mayas de la península de Yucatán, aprovechando la experiencia adquirida en otros contextos. Una visita preliminar de algunos sitios del norte de la península (Cobá, Chichén Itzá, y Ruta Puuc) se llevó a cabo en febrero de 2012 entre Marie-Françoise André (profesora de Geomorfología en la Université Blaise Pascal), Erwan Roussel (doctorado en Geomorfología e ingeniero CNRS – MSH USR 3550 Clermont-Ferrand) y Paul-Edgard Genet (estudiante de Master). Esta especie de reconocimiento previo permitió juzgar la factibilidad de la investigación y confirmó la importancia de emprender un

estudio sobre la piedra caliza monumental de la zona maya con la perspectiva geomorfológica desarrollada por nuestro laboratorio, pero en colaboración con otros especialistas.

1.3.1. Justificación del interés por los sitios arqueológicos mayas de Yucatán

En primer lugar, el interés por los sitios arqueológicos mayas de Yucatán se justifica por la similitud de su historia ambiental con la de los monumentos estudiados en Camboya. Templos mayas y khmers en efecto presentan similitudes: 1) la ubicación en un medio tropical que induce un nivel alto de agresividad climática con variaciones estacionales de las precipitaciones y altas amplitudes térmicas diurnas; 2) fueron "recientemente" excavados de la selva tropical favoreciendo el aumento del estrés higrotérmico el cual afecta las piedras de construcción. Estos materiales son areniscas en Angkor y piedras calizas en Yucatán. Por lo tanto consideramos interesante comparar la respuesta erosiva de los monumentos de piedra caliza yucateca a las agresiones ambientales con la de las areniscas camboyanas, también teniendo en cuenta la diversidad de los materiales de construcción en la península; 3) muchas intervenciones humanas han sido llevadas a cabo en la época contemporánea, desde su descubrimiento hasta las campañas de excavación, despejo, y restauración, las cuales podrían tener consecuencias en la conservación o en el deterioro de la piedra monumental.

El enfoque por desarrollar en Yucatán es fundamentalmente interdisciplinario, caracterizado por intercambios permanentes con los arqueólogos, geólogos, microbiólogos y actores de la conservación, ya investigando en la región. El proyecto propuesto se asocia directamente con las problemáticas de conservación enfrentadas por el equipo de arqueólogos que trabajaron en Río Bec del 2003 al 2010 (laboratorio ArchAm) así como por el grupo de restauradores que trabajaron en el mismo proyecto bajo la dirección de Yareli Jaídar y, en particular, Luisa Straulino (ENCRyM) en el marco de su tesis de licenciatura. También el trabajo por realizar será llevado a cabo con la colaboración de Otto Ortega-Morales (Universidad Autónoma de Campeche), sobre el tema del biodeterioro y de la bioestabilización de los monumentos excavados. El programa propuesto apunta a mejorar el conocimiento de los procesos y velocidad de deterioro de la piedra monumental, para contribuir a la reflexión sobre las estrategias de restauración y los procesos de conservación.

1.3.2. Principales enseñanzas de la visita preliminar de febrero 2012

La visita informal que se efectuó en febrero de 2012 tenía cuatro objetivos básicos: adquirir una idea preliminar de los ambientes climáticos y de los materiales de construcción, categorizar visualmente las formas e intensidades de deterioro y reflexionar sobre las maneras de cuantificar de la erosión.

Los resultados del **monitoring climático** en los alrededores del sitio de Cobá (Fig. 4) demuestra el contraste entre los ambientes climáticos forestales y no forestales.

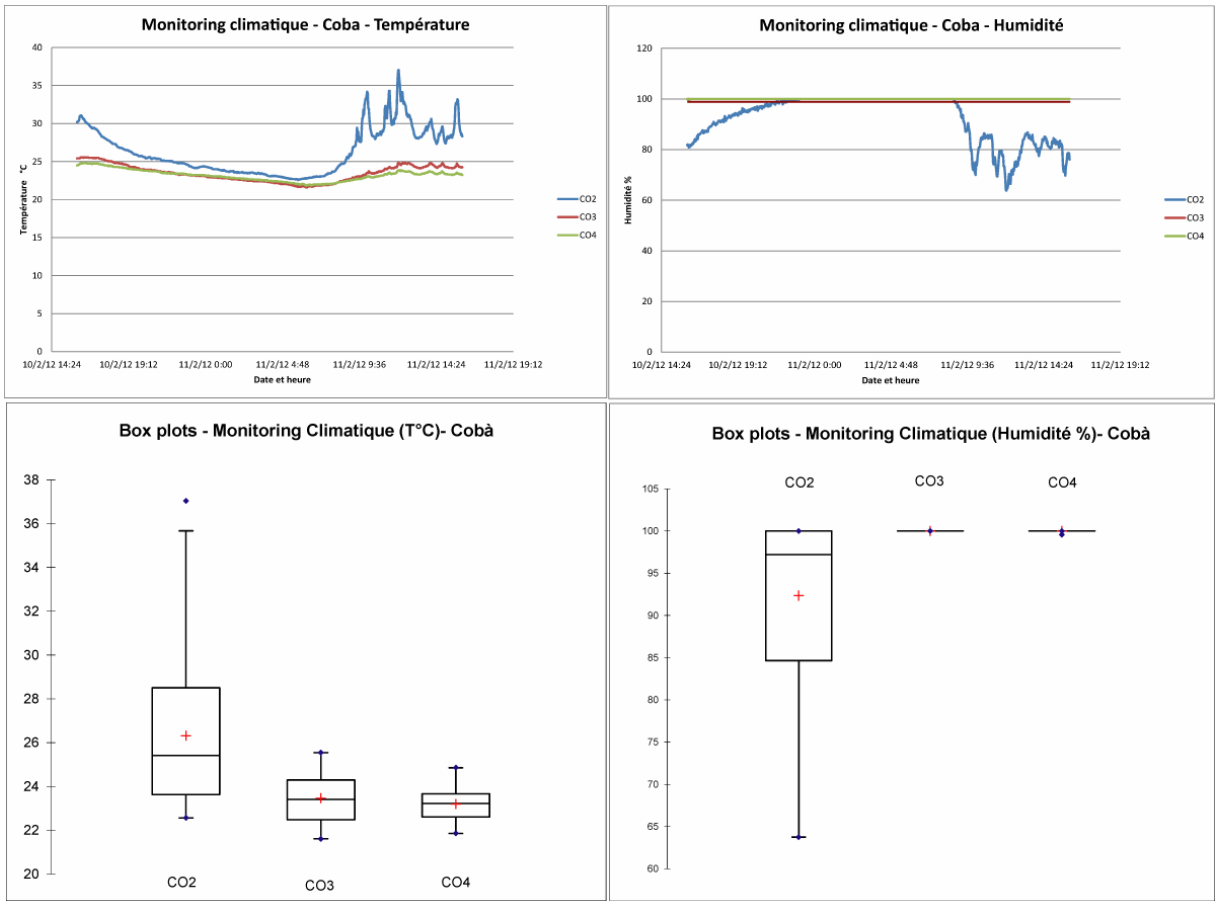


Figura 4: Monitoring climático a inmediaciones del sitio de Cobá. Las curvas CO3 y CO4 corresponden a los sensores ubicados bajo la selva, la curva CO2 al sensor ubicado al aire libre (Genet, 2012).

La instalación de sensores de temperatura y humedad durante algunos días cerca del sitio ha confirmado que las amplitudes térmicas diurnas son mucho más amplias al aire libre, lo que favorece los procesos de desgaste mecánico. Por el contrario, la cobertura forestal favorece temperaturas y humedad constantes y puede tener un papel protector para la piedra. Estos resultados pueden relacionarse con los trabajos llevados a cabo en Angkor, los cuales han demostrado el cambio de intensidad y de velocidad de los procesos de deterioro después del despejo de los templos, pasando de un régimen de biodeterioro lento bajo la selva a un régimen de desgaste mecánico rápido al aire libre. El impacto de este tipo de intervenciones ha sido planteado con anterioridad a propósito de los sitios mayas (García de Miguel et al. 1995), especialmente con la exposición de los edificios a la insolación.

La primera **caracterización macroscópica y puramente visual de los materiales de construcción** ha permitido identificar varias facciones de piedras calizas que a la luz de las primeras observaciones presentan una vulnerabilidad variable al deterioro. Las piedras calizas blancas de Chichén Itzá y de la región Puuc parecen más resistentes que sus homólogas ocres y rojas, las facciones de brecha parecen ser las más vulnerables. Las diferentes piedras calizas que hemos observado durante la visita del 2012 pueden relacionarse con las que están catalogadas en la bibliografía (Héraud-Piña 1996, Maldonado et al. 2011). Una mejor caracterización de las piedras y el establecimiento de una tipología precisa de los materiales de construcción y de recubrimiento requiere extracciones *in situ* de muestras de las materias

primas utilizadas en la construcción para llevar a cabo observaciones y análisis mineralógicos, geoquímicas y petrofísicas.

La categorización de las formas e intensidades de deterioro se ha esbozado mediante observaciones cualitativas y por el uso de escalas visuales de deterioro en el registro fotográfico de elementos esculpidos similares y repetitivos como en el Tzompantli de Chichén Itzá y el Codz Poop en Kabáh. Los resultados enseñan como era de esperar la espacialidad de la colonización biológica y su correlación con las formas del deterioro, y también la influencia de las características morfológicas y arquitectónicas de los edificios sobre la velocidad y la intensidad de los procesos. Sin embargo, estas primeras impresiones deben ahora desembocar en una verdadera investigación sistemática y tendrá que tomar en cuenta en particular la historia de las investigaciones de los edificios y de las intervenciones que han conocido.

Un primer intento visual de **cuantificación de los índices de retroceso** de las piedras de paramento y de espacialización de la erosión ha sido esbozado en el Cuadrilátero de las Monjas en Uxmal y en un edificio del grupo del Codz Poop en Kabáh. Los índices de retroceso visualizados confirman que la intensidad de deterioro depende de varios parámetros como la petrografía, la exposición, la postura de los materiales. Pero la estimación de la velocidad de deterioro también necesita un conocimiento preciso de los edificios para disponer de superficies de referencia fiables y bien datadas.

1.3.3. Extensión del corpus de sitios por estudiar a la región de Río Bec

La perspectiva de extensión del corpus de sitios que se piensan estudiar a la región de Río Bec se justifica por la importancia de la toma en cuenta de dos grandes factores: 1) la diversidad petrográfica de los materiales de construcción, y 2) el gradiente climático y biogeográfico de la península. En efecto, las piedras calizas de Río Bec están evaluadas como más desmenuzables y más vulnerables al deterioro; además, la región es caracterizada por precipitaciones más abundantes y por una vegetación más densa que en el norte de la península.

Por otro lado, nuestro interés por estos sitios se funda también en el estilo arquitectónico de la región de Río Bec, lo que permite desarrollar los métodos específicos de nuestro enfoque (paneles decorativos, frisos, organización regular de los materiales de construcción), y también en el conocimiento de la temporalidad de las excavaciones y restauraciones llevadas a cabo en estos sitios. En efecto, la colaboración con el laboratorio “Archéologie des Amériques” (UMR 8096) nos da acceso a la cronología precisa de las intervenciones, lo que es una buena condición para llegar a resultados fiables. Asimismo, los trabajos recientes del equipo de Otto Ortega-Morales de la Universidad Autónoma de Campeche (Ortega-Morales et al. 2012) demuestran el interés de estos sitios para el estudio de la biocolonización y para la identificación de relaciones entre colonización vegetal, deterioro o estabilización de las piedras de paramento.

2. Actividades de investigación previstas en 2013

Se somete al Consejo de arqueología la presente solicitud concerniendo unos trabajos de campo que tendrían lugar entre fines de febrero y mediados de marzo de 2013. De hecho, además de la toma de contactos con las autoridades concernidas y el establecimiento de colaboraciones con equipos de investigación mexicanos tanto en la UNAM como en la Universidad Autónoma de Campeche y las diferentes dependencias que intervienen en la restauración de los sitios (Coordinación nacional, Escuela nacional, Centros regionales INAH), el trabajo previsto comportará una visita de varios grupos arquitectónicos de la zona Río Bec así como de algunos sitios de la región del Puuc con el fin de realizar diferentes medidas y sacar muestras (véase más adelante).

2.1. Sitios de estudio, itinerario y calendario de campaña

La campaña se desarrollará desde el 20 de febrero hasta el 15-20 de marzo de 2013 de acuerdo con el calendario provisional que proponemos (véase más adelante). La llegada a México DF está prevista para el 20 de febrero y se aprovecharán los primeros días para encontrar a diferentes posibles colaboradores en México DF (UNAM y ENCRyM en particular) en Campeche (Centro regional INAH así como el equipo de Otto Ortega-Morales en la Universidad Autónoma de Campeche).

El trabajo de campo propiamente dicho será dividido en dos secuencias:

1. **Río Bec (25/02 – 04/03)**: visita de grupos de la región Río Bec con Dominique Michelet, y con el equipo de Otto Ortega-Morales. El trabajo se centrará en grupos de la micro-región de Río Bec y en los sitios de Chicanná, Becan y Hormiguero. Los participantes de esta secuencia serán, aparte de los investigadores ya citados, Marie-Françoise André y Paul-Edgard Genet. Los trabajos previstos son (ver detalle más abajo): observaciones geomorfológicas, registros fotogramétricos y durométricos, instalación de sensores climáticos y extracción de muestras de piedras de construcción (ver más adelante para los detalles).

2. **Región Puuc (5-15/03)**: después de la visita exploratoria de febrero de 2012, un recorrido complementario será efectuado por Paul-Edgard Genet en los sitios del norte de la península (Xcalumkín, Xculoc, Chunhuhub, Uxmal, Kabáh, Labná, con, tal vez, una extensión a Chichén Itzá). Los trabajos previstos serán los mismos que los detallados para Río Bec y serán precedidos por una búsqueda bibliográfica que permita un mejor conocimiento de la cronología de las intervenciones sobre los edificios.

Calendario tentativo

— 21 y 22/02: contactos en la ciudad de México: UNAM y Escuela Nacional de Restauración + Coordinación Nacional de Restauración. Vuelo al Sureste.

— 25/02: visita al Centro regional INAH Campeche y contactos en la Universidad Autónoma de Campeche. Viaje terrestre a Zoh Laguna (zona Río Bec).

— Del 26/02 al 03/03: trabajos en sitios de la zona (grupos de la micro-región de Río Bec, Hormiguero, Chicanná, Becan).

— Del 05/03 al 13/03: trabajos en sitios de la zona Puuc (Xcalumkín Xculoc, Chunhuhub, Kabah, Labná, Uxmal con una posible extensión hasta Chichén Itzá).

— Entre el 14/03 y el 18/03, trabajos de laboratorio en la Universidad de Campeche y, luego, en la UNAM.

— 19/03: viaje de regreso a Francia.

2.2. Descripción de las actividades

2.2.1. Actividad 1: Organización de las colaboraciones e investigación documentaria

La primera actividad prevista concierne la toma de contactos con las autoridades, los equipos científicos y los actores de la conservación, eso primero para presentar y discutir el proyecto, inventariar los datos ya recabados por los diferentes grupos involucrados y/o interesados en el tema y concretizar colaboraciones para el futuro con equipos ya contactados, en la UNAM y en la Universidad Autónoma de Campeche especialmente.

2.2.2. Actividad 2: Registros en el campo

- ***Investigaciones geomorfológicas***

Con el principal objetivo de categorizar las formas e intensidad de deterioro, las investigaciones geomorfológicas se basan en el método de la escala visual de deterioro. El método consiste de una serie de observaciones visuales cualitativas y sistemáticas sobre objetos tallados y esculpidos similares y repetitivos que permita la obtención de una muestra significativa y explotable estadísticamente. Los parámetros estudiados para un objeto particular son los niveles de erosión química y mecánica (escala de legibilidad), las diversas formas de deterioro y los tipos de organismos colonizadores (Figura 5).

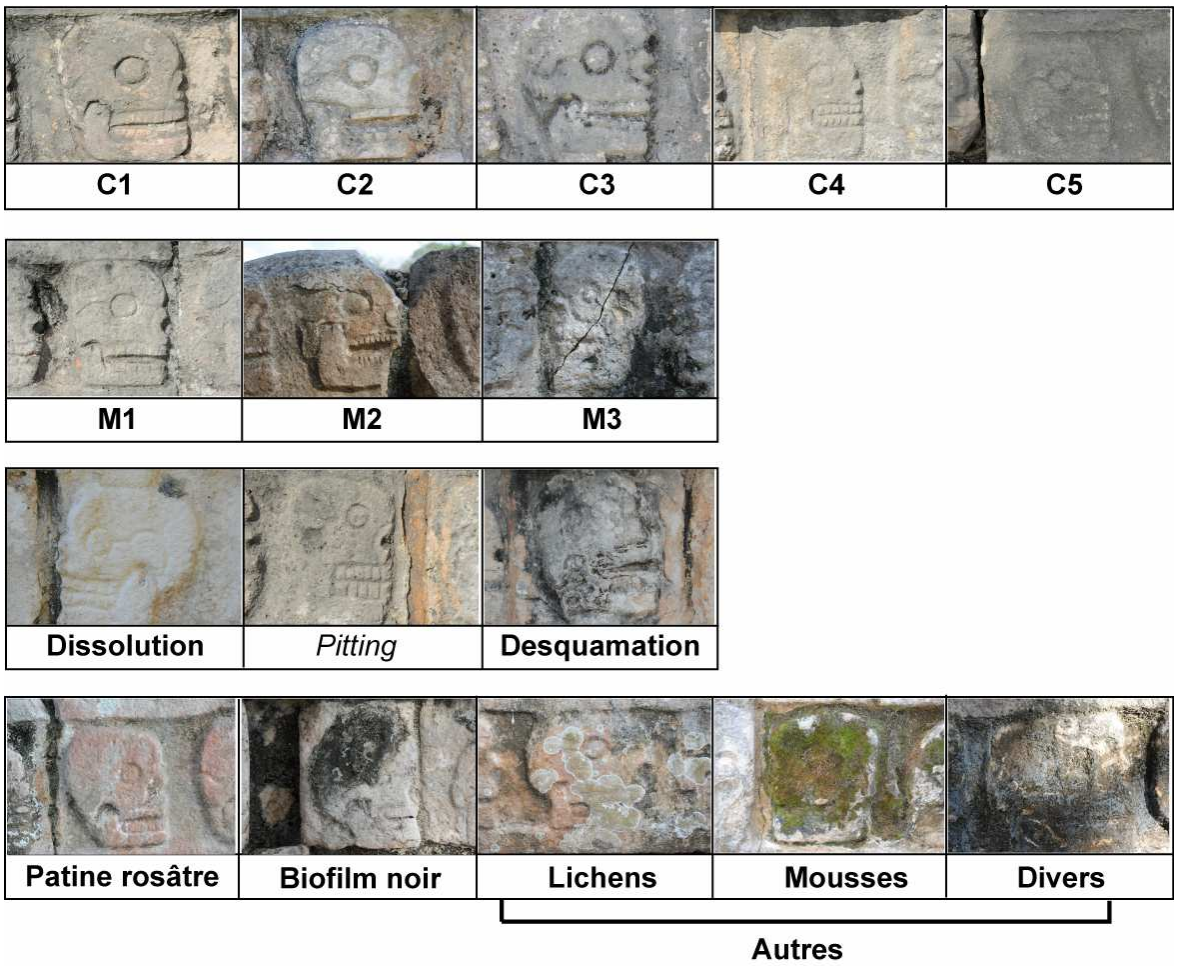
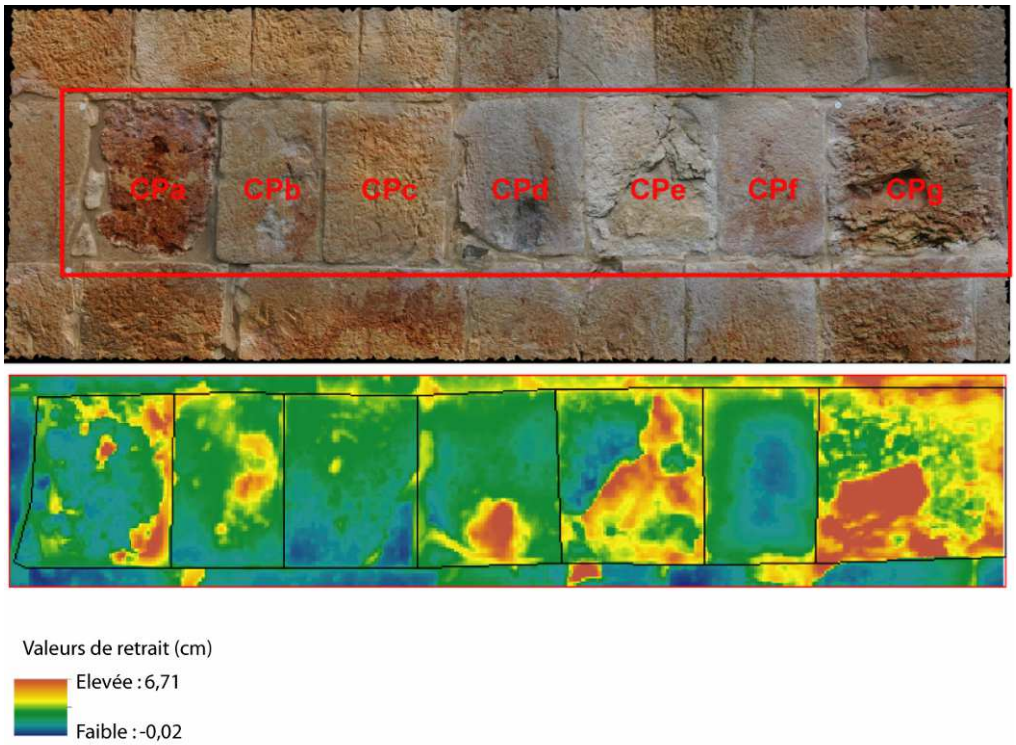


Figura 5: Escala visual de deterioro con base en fotos tomadas en el Tzompantli de Chichén Itzá durante la visita de 2012

Este método será llevado a cabo en unos grupos arquitectónicos de Río Bec teniendo en cuenta la disponibilidad de motivos esculpidos que permiten su realización. También será utilizado en algunos sitios del norte de la península (en el Puuc y Chichén Itzá).

- ***Registros fotogramétricos***

Los registros fotogramétricos tienen como objetivo la cuantificación y la espacialización 3D del deterioro a partir de la fotogrametría. Este método apunta a la restitución digital de las formas y de la posición espacial de un objeto utilizando varias fotografías de este objeto tomadas desde varios ángulos. Las fotografías son insertadas en un programa (Addinsoft Photoscan, Bundler, o MeshLab) que efectúa la modelización reconociendo automáticamente los pixeles similares entre distintas fotografías. El modelo así obtenido es posteriormente georeferenciado y exportado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita cuantificar los índices de retroceso de las piedras de paramento por extrapolación de una superficie de referencia basada en el conocimiento previo del edificio (Figura 6).



Pierre	Pétrographie	Pose	Types d'altération	Retrait min-max (cm)	Retrait moyen (cm) -EC
CP a	Calcaire rouge	N/A	Alvéolisation ++	0,08 - 2,82	0,93 - 0,50
CP b	Calcaire ocre	Perpendiculaire	Alvéolisation	0,28 - 2,20	0,97 - 0,34
CP c	Calcaire ocre	Parallèle	Alvéolisation +	0,07 - 1,43	0,69 - 0,27
CP d	Calcaire blanc à veinage ocre	Perpendiculaire	Dissolution / Détachement	0,19 - 3,14	0,97 - 0,43
CP e	Calcaire blanc	N/A	Desquamation	0,07 - 2,58	1,23 - 0,52
CP f	Calcaire ocre à veinage rouge	Perpendiculaire	Dissolution / Pitting	0,19 - 1,92	0,71 - 0,32
CP g	Calcaire rouge	Parallèle	Alvéolisation ++ / Tafonis	0,54 - 6,16	1,77 - 0,92

Figura 6: Cuantificación de los índices de retroceso en un edificio del Codz Poop en Kabah (2012)

- ***Registros durométricos***

Estos registros apuntan a comparar la resistencia mecánica de los materiales de construcción y son efectuados *in situ* con un método desarrollado por Proceq con la colaboración de los gestores del patrimonio. Se trata de utilizar el durómetro Equotip Piccolo 2 (Figura 7), un instrumento ligero (142 g) y manuable que se aplica directamente sobre las fachadas de los edificios. El índice de rebote permite evaluar la resistencia de los materiales. Este método que no afecta de ninguna manera el edificio medido ha sido validado por los investigadores de Oxford trabajando sobre distintos sitios patrimoniales, y probado por nuestro equipo en una iglesia romana de Auvergne (Francia).

Figura 7: Durómetro utilizado para probar la resistencia mecánica de los materiales, aquí en una iglesia medieval de Malicorne (Francia).

- ***Monitoring climático***

El monitoring climático apunta a caracterizar los ambientes climáticos forestales y no forestales mediante la instalación de sensores de temperatura y humedad relativa sobre una fachada dada. Son sensores de pequeño tamaño, de tipo "AOIP-SL54 iButtons" (ya utilizados durante 2 años en Camboya; Figura 8), que se instalan con pasta adhesiva sobre los muros de los edificios sin ocasionar absolutamente ningún daño. Las muestras recolectadas son tratadas estadísticamente para obtener curvas comparativas.

Figura 8: Sensores de monitoring climático utilizados en Angkor (André et al. 2012b).

La campaña de muestreo de 2013 será efectuada en un grupo de Río Bec y en un sitio de la Ruta Puuc, según la disponibilidad de estructuras despejadas y al aire libre. La lógica de instalación de los sensores tomará en cuenta la exposición de los edificios y las características (bio)geomorfológicas de las superficies medidas (intensidad de deterioro, biopelículas). Esperamos, de ser posible, dejar los sensores instalados durante más de un año para obtener una muestra fiable que abarque la estacionalidad del medio tropical de la península.

2.2.3. Actividad 3: Extracción de muestras

Solicitamos la autorización para hacer extracciones de muestras en sitios de Río Bec, de la región Puuc, y en Chichén Itzá. Estas extracciones apuntan principalmente a caracterizar química y físicamente los materiales de construcción, y a examinar la interfaz entre las biopelículas y las piedras.

- ***Tipo y tamaño de las extracciones***

1) Materiales de construcción de origen y de sustitución (piedra caliza, morteros, estucos,…) : 1cm3 – 10cm3

2) Biopelículas colonizadoras (cianobacterias, musgos, algas, líquenes) con sus soportes: 1cm3 – 10cm3

- ***Condiciones de extracción***

Las muestras se sacarían de fragmentos ya deprendidos de los edificios y acumulados en sus alrededores.

2.2.4. Actividad 4: Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio a llevar a cabo son las siguientes:

- Laminas petrográficas (microscopia óptica)
- MEB (microscopia electrónica)
- Análisis geoquímicos (ICP/AES)
- Análisis petrofísicos (porosidad, permeabilidad,…)
- Difractometría X (sales y argilas)

Estos análisis serán llevados a cabo en una parte en Francia y en otra en México, según las colaboraciones desarrolladas. En Francia, tenemos colaboraciones con el laboratorio de geología de Clermont-Ferrand, el laboratorio de hidrología y geoquímica, y el Institut de Physique du Globe de Strasbourg. Sin embargo, la colaboración con laboratorios mexicanos sería más que apreciada.

2.3. Presupuesto provisional

El proyecto que proponemos se beneficia de tres fuentes de financiamiento:

1) El contrato doctoral de Paul-Edgard Genet que dura desde octubre de 2012 hasta octubre de 2015 (Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand 2)

2) El Institut Universitaire de France, con el programa “Approche géoarchéologique intégrée de la dégradation de la pierre monumentale”, coordinado por M-F André desde 2010 y hasta 2015.

3) El laboratorio GEOLAB (UMR 6042 – CNRS/Université Blaise Pascal).

	En €	en $MEX
Transporte		
Vuelos Ida y vuelta Paris-México (para M-F André y P-E Genet)	1600	26800
Vuelas ida y vuelta México-Campeche (para los mismos)	540	9045
Alquiler de vehículo y transporte local	1200	20200
Hospedaje (para dos)	700	11800
Alimentación (para dos)	600	10100
Documentación	150	2500
Pago de guías	300	5050
Varios gastos	150	2500
TOTAL	**5240**	**88000**

Referencias

ANDRÉ M.F. 2006. Sandstone weathering rates at the Angkor temples (Cambodia). In: Fort R, Alvarez de Buergo M, Gómez-Heras M, Vasquez-Calvo C (eds). *Heritage, weathering and conservation*, Taylor & Francis: London, 499-517

ANDRÉ M.-F., ETIENNE S., MERCIER D., VAUTIER F., VOLDOIRE O. 2008. Assessment of sandstone deterioration at Ta Keo temple (Angkor): First results and future prospects. *Environmental Geology,* 56: 677-688.

ANDRÉ M.-F. & PHALIP B. 2010. Evaluating rates of stone recession on Mediaeval monuments: some thoughts and methodological perspectives. *Cadernos do Laboratorio xeolóxico de Laxe*, A Coruña, 35: 13-40.

ANDRÉ M.F, PHALIP B., VOLDOIRE O., VAUTIER F., GÉRAUD Y., BENBAKKAR M., CONSTANTIN C., HUBER F., MORVAN G., 2011. Weathering of sandstone lotus petals at the Angkor site: a 1,000-year stone durability trial. *Environmental Earth Sciences* 63: 1723-1739.

ANDRÉ M.F, PHALIP B., VOLDOIRE O., ROUSSEL E., VAUTIER F., MOREL D., 2012a. Quantitative assessment of post-restoration accelerated stone decay due to compatibility problems (St. Sebastian's abbey church, Manglieu, French Massif Central). *Proceedings of the 12th Conference on stone deterioration and conservation, Columbia University – New York*, 22-26 Nov. 2012, 10 p. (accepté, sous presse).

ANDRÉ M.F., VOLDOIRE O., ROUSSEL E., VAUTIER F., PHALIP B., HANG P., 2012b. Contrasting weathering and climate regimes in forested and cleared sandstone temples of the Angkor region. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 519-532.

BRIMBLECOMBE P. (ed.) 2003. *The effects of air pollution on the built environment.* Imperial College Press: London. 428 p.

CARTER N.E.A. & VILES H.A. 2005. Bioprotection explored: the story of a little known earth surface process. *Geomorphology* 67: 273-281.

GARCIA DE MIGUEL J.M., SANCHEZ-CASTILLO L., ORTEGA-CALVO J.J., GIL J.A., SAIZ-JIMENEZ C. 1995. Deterioration of building materials from the great jaguar pyramid at Tikal, Guatemala. *Building and Environment* 30 (4): 591-598.

GAYLARDE C.C. & GAYLARDE P.M. 2005. A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America. *International Biodeterioration and Biodegradation* 55: 131-139.

GAYLARDE P., ENGLERT G., ORTEGA-MORALES O., GAYLARDE C. 2006. Lichen-like colonies of pure *Trentepohlia* on limestone monuments. *International Biodeterioration and Biodegradation* 58: 119-123.

GAYLARDE C.C., ORTEGO-MORALES B.O., BARTOLO-PÉREZ P. 2007. Biogenic black crusts on buildings in unpolluted environments. *Current Microbiology* 54: 162-166.

GENET P-E. 2012. L'érosion des calcaires monumentaux du Yucatan. Mémoire de Master, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand. 95p.

HERAUD-PINA M.A. 1996. *Le karst du Yucatan, pays des mayas.* Presses Universitaires de Bordeaux. 284p.

KONKOL N.R., McNAMARA C.J., BLANCHETTE R.A., MAY E., MITCHELL R. 2008. Microbes can damage but also help restore artifacts. *Microbe* 3 (12): 563-567.

MALDONADO LOPEZ L., TORRES LORIA, HALSEY D.P., 1998. Initial investigations into the deterioration of Maya limestone monuments at Uxmal, Mexico. In: *Aspects of stone weathering, decay and conservation* (M.S. JONES & R.D. WAKEFIELD, eds), Imperial College.

MEIERDING T.C. (1993). Inscription legibility method for estimating rock weathering rates. *Geomorphology* 6, 273-286.

MICHELET D. (coord.) 2007. *Proyecto Río Bec (Campeche, Mexique). Informe de la quinta temporada, del 5 de febrero al 4 de mayo de 2006*. México, Consejo de Arqueología, INAH.

MICHELET D. (coord.) 2008. *Proyecto Río Bec (Campeche, Mexique). Informe de la sexta temporada, del 4 de febrero al 3 de mayo de 2007*. México, Consejo de Arqueología, INAH.

MICHELET D. (coord.) 2009. *Proyecto Río Bec(Campeche, Mexique). Informe de la séptima temporada, 2008*. México, Consejo de Arqueología, INAH.

MOTTERSHEAD D.N. 2000. Weathering of coastal defensive structures in south-west England: a 500 year stone durability trial. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1143-1159.

ORTEGA-MORALES B.O., HERNÁNDEZ-DUQUE G., BORGES-GÓMEZ L., GUEZENNEC J. 1999. Characterization of epilithic microbial communities associated with Mayan stone monuments in Yucatán. *Geomicrobiology Journal* 16: 221-232.

ORTEGA-MORALES B.O., GUEZENNEC J. , HERNÁNDEZ-DUQUE G., GAYLARDE C.C., GAYLARDE P.M. 2000. Phototrophic biofilms on ancient Mayan buildings in Yucatan, Mexico. *Current Microbiology* 40: 81-85.

ORTEGA-MORALES B.O., NARVÁEZ-ZAPATA J.A., SCHMALENBERGER A., SOSA-LÓPEZ A., TEBBE C.C. 2004. Biofilms fouling ancient limestone Mayan monuments in Mexico: a cultivation-independent analysis. *Biofilms* 1: 79-90.

ORTEGA-MORALES B.O. 2006a. Cyanobacterial diversity and ecology on historic monuments in Latin America. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 48 (2): 188-189.

ORTEGA-MORALES B.O. 2006b. Biopelículas microbianas asociadas a monumentos mayas en México y su papel en el deterioro pétreo. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 48 (2) : 189-191.

ORTEGA-MORALES B.O., GAYLARDE C., ANAYA-HERNANDEZ A., CHAN-BACAB M.J., DE LA ROSA-GARCÍA S.C., ARANO-RECIO D., MONTERO-M J. 2012. Orientation affects *Trentepohlia*-dominated biofilms on Mayan monuments of the Río Bec style. *International Biodeterioration and Biodegradation.* http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.07.014

PARADISE T.R. 2005. Petra revisited: an examination of sandstone weathering research in Petra, Jordan. *Geological Survey of America Special Paper* 390: 39-49.

PHALIP B., VOLDOIRE O., ANDRÉ M.-F, VAUTIER F., ROUSSEL E., 2012. Les grès de Souvigny : un diagnostic des altérations sur les églises Saint-Marc et Saint-Pierre. In : *Souvigny – La priorale et le prieuré* (B. Phalip, P. Chevalier, A. Maquet, D. Renault-Jousseau, dir.). Cahiers du Patrimoine n° 101, Inventaire général du patrimoine culturel – Région Auvergne, Editions d'Art Somogy, Paris, 118-121.

POPE G.A., MEIERDING T.C., PARADISE T.R. 2002. Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone. *Geomorphology* 47: 211-225.

QUIST W.J. 2009. Replacement of natural stone in conservation of historic buildings – Evaluation of replacement of natural stone at the church of Our Lady in Breda. *Heron*, 54(4): 251-278.

ROBINSON D.A. & WILLIAMS R.B.G. 1996. An analysis of the weathering of Wealden sandstone churches. In: B.J. SMITH and P.A. WARKE (eds), *Processes of urban stone decay*, Donhead Publishing Ltd, 133-149.

SELLIER D. 1997. Utilisation des mégalithes comme marqueurs de la vitesse de l'érosion des granites en milieu tempéré: enseignements apportés par les alignements de Carnac (Morbihan). *Zeitschrift für Geomorphologie* 41 (3): 256-319.

STRAULINO L. 2010a. *Fluoruro de sodio: Una alternativa para la conservación de piedra caliza disgregada a través de la remineralización - El caso de la cornisa del edificio 5N2 del Grupo A en Río Bec, Campeche*. Tesis de licenciatura en Restauración, México, ENCRyM.

STRAULINO L. 2010b. El fluoruro de sodio, una alternativa para la conservación de roca caliza disgregada. Intervención – Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología 1 (2): 24-33.

VAUTIER F. & VOLDOIRE O. 2011. Comparaison lasergrammétrie-photogrammétrie pour la mesure de l'érosion de pierres de façade, abbatiale de Manglieu, Puy-de-Dôme. In : *Images et modèles 3D en milieux* naturels, collection Edytem 12 : 199-205.

WEBSTER A. & MAY E. 2006. Bioremediation of weathered-building stone surfaces. *Trends in Biotechnology* 24 (6): 255-260.

YOUNG M.E., BALL J., LAING R.A., CORDINER P., SCOTT J. 2000. *An investigation of the consequences of past stonecleaning intervention on future policy and resources*. Report to Historic Scotland.

Table des figures

Fig. 1. La une du *New York Times* du 12 juin 1973, consacrée à la redécouverte du site de Río Bec 13

Fig. 2. Le monument : un objet d'étude à double entrée. 14

Fig. 3. Facteurs de contrôle de la détérioration de la pierre monumentale et disciplines impliquées dans la thématique de recherche. 15

Fig. 4. Localisation du secteur archéologique étudié, et mise en perspective de la période Río Bec au sein de la chronologie de la culture maya. 17

Fig. 5. Trajectoires d'interventions potentielles sur une structure archéologique après sa redécouverte. 19

Fig. 6. Les quatre étapes de travail en lien avec les objectifs identifiés et les méthodes adoptées pour y répondre 20

Fig. I-1. Les disciplines impliquées dans l'étude de la conservation de la pierre monumentale (Pope *et al.,* 2002). 26

Fig. I-2. Cartographie des formes et intensités d'érosion sur les grès de Petra en Jordanie (Heinrichs, 2008). 27

Fig. I-3. Différents phénomènes de détérioration des calcaires londoniens (*Portland stone* et *Monk Park's stone*) par les polluants atmosphériques (Jaynes et Cooke, 1987). 30

Fig. I-4. Modèle conceptuel de la détérioration des calcaires monumentaux en milieu urbain, proposé par Smith et Viles (2006). 31

Fig. I-5. Exemples typiques de *black crusts*, en dessous desquelles se développe une désagrégation granulaire importante (Delgado Rodrigues, 2015) 32

Fig. I-6. Développement en cinq phases de l'alvéolisation sur les calcaires de Malte (Rothert *et al.,* 2007). 34

Fig. I-7. Différents types de mécanismes dans la biodétérioration des matériaux de construction en milieu tropical (d'après Kumar et Kumar, 1999) 36

Fig. I-8. Différents mécanismes de protection de la roche par les biofilms (modifié et traduit d'après Gadd et Dyer, 2017). 40

Fig. I-9. Biominéralisation des carbonates par cyanobactéries de genre *Gloeocapsa* en milieu contrôlé abiotique (a et b) et biotique (c et d) (Bundeleva *et al.* 2014). 41

Fig. I-10. Modélisation de la récession de surface des grès de l'Église Saint-Marc de Souvigny (Allier) par André *et al.* (2014). (a) photographie (b) modèle en trois dimensions construit par relevé LiDaR (c) Cartographie de quantification de l'érosion post-rejointoiement. 43

Fig. I-11. Mise en évidence par lasergrammétrie de l'érosion accentuée des gneiss médiévaux après l'insertion de granites incompatibles au XIXe siècle (André *et al.*, 2012a.). 44

Fig. I-12. Corrélation entre le nombre de visiteurs et l'humidité relative dans la chambre d'Al- Khazneh à Pétra, Jordanie (Paradise, 2005). 46

Fig. I-13. Mise en évidence des périodes d'érosion accélérée par photogrammétrie diachronique. Temple de Ta Keo, Angkor, Cambodge. (André *et al.*, 2011) 47

Fig. I-14. Echelles visuelles de détérioration mécanique et biochimique des pétales de lotus de Ta Keo à Angkor, Cambodge (André *et al.,* 2012b) 47

Fig. I-15. Résultats de l'application des échelles visuelles de détérioration à la comparaison des sites sous forêt et à l'air libre. Angkor, Cambodge (André *et al.*, 2012b). 48

Fig. II-1. Cadre chronologique le plus largement accepté de la civilisation maya (modifié d'après Demarest, 2004), en rouge la période de développement du style Río Bec. 52

Fig. II-2. La péninsule du Yucatán et ses différentes régions écologiques et culturelles. 53

Fig. II-3. Délimitation locale de la région Río Bec (Nondédéo *et al*, 2010) 54

Fig. II-4. Stratification des séquences calcaires de la péninsule du Yucatán (modifié et traduit d'après Durán et Méndez, 2010). 56

Fig. II-5. Profils stratigraphiques A (à gauche) et B (à droite) identifiés sur les bancs rocheux exploités sur le site éponyme de Río Bec (modifié d'après Gillot, 2018) 60

Fig. II-6. Observations en lames minces des échantillons prélevés dans le profil lithostratigraphique A des bancs rocheux exploités à Río Bec (modifié d'après Gillot, 2018). 62

Fig. II-7. Observations en lames minces (A, B, C, D) et au microscope électronique à balayage (E, F) des principales structures retrouvées dans les croûtes calcaires (modifié d'après Linoir, 2014, et Zhou et Chafetz, 2009). 63

Fig. II-8. Association des caractéristiques micro et macroscopiques des croûtes calcaires aux micro-organismes intervenant dans la biogenèse (modifié d'après Zhou et Chafetz, 2009). 64

Fig. II-9. Distribution des types de climats et des précipitations dans la partie mexicaine de la péninsule du Yucatán (modifié d'après Torrescano-Valle et Folan, 2015). 67

Fig. II-10. Diagramme ombrothermique de la ville de Xpujil, localisée au cœur du secteur Río Bec (source : climate-data.org, consulté le 21/11/2018). 68

Fig. II-11. Carte simplifiée de distribution de la végétation dans la péninsule du Yucatán (modifié et traduit d'après Islebe *et al.,* 2015). 69

Fig. II-12. Aperçu de la végétation à proximité du site éponyme Río Bec. 71

Fig. II-13. Aperçu des principaux organismes colonisateurs susceptibles d'être représentés dans le secteur étudié. 73

Fig. II-14. Reconstitution de l'édifice 5N2 à Río Bec, indiquant les principales caractéristiques du style architectonique éponyme (modifié d'après Michelet *et al.,* 2013). 80

Fig. II-15. Différentes caractéristiques de la tour nord de l'édifice 6N1 à Río Bec. 81

Fig. II-16. Vue d'ensemble du site de Xpuhil, montrant l'organisation en édifices multi-pièces comprenant plusieurs chambres, agencées selon le format tripartite. 82

Fig. II-17. Schéma des principaux composants des chambres du secteur Río Bec (à gauche, cliché de l'auteur, à droite figure de Gillot, 2018). 83

Fig. II-18. Porte zoomorphe de l'édifice II de Chicanná. 84

Fig. II-19. Les crêtes faîtières qui surmontent l'édifice 6N1 de Río Bec. 85

Fig. II-20. Panneaux iconographiques sur la façade nord de l'édifice 5N2 de Río Bec, montrant des cabosses de cacaoyer encadrées par des motifs en grecques. 85

Fig. II-21. Panneaux à damiers sur la façade est de la structure II de Becán (à gauche), et sur la façade est de la structure 6N1 de Río Bec. 86

Fig. II-22. Localisation des sites archéologiques étudiés, autour de la localité de Xpujil. 87

Fig. II-23. Carte de Becán dressée par la *Carnegie Institution*, modifiée pour localiser les groupes identifiés lors de la redécouverte du site (Ruppert et Denison, 1943). 89

Fig. II-24. La structure I de Xpuhil et son système de tours atypique. 90

Fig. III-1. Localisation des prélèvements effectués à Becán. 97

Fig. III-2. Localisation des prélèvements effectués à Xpuhil. 98

Fig. III-3. Localisation des prélèvements effectués à Río Bec. 99

Fig. III-4. Capteur iButton sur une des surfaces rocheuses étudiées. 103

Fig. III-5. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Xpuhil. 106

Fig. III-6. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Xpuhil II. 106

Fig. III-7. Localisation des capteurs de monitoring climatique à Becán. 107

Fig. III-8. Abaque de l'état de conservation des matériaux de construction. 111

Fig. III-9. Abaque des principales formes de détérioration relevées dans le secteur Río Bec. 112

Fig. III-10. Principaux microorganismes colonisateurs dans les sites archéologiques du secteur Río Bec. 112

Fig. III-11. Échelles visuelles de détérioration chimique et mécanique construites pour l'étude des blocs constituant les panneaux à damiers de Becán et Río Bec. 113

Fig. III-12. Différents canevas des jeux de données obtenus lors du diagnostic de la dynamique érosive et mention du type de variables étudiées. 114

Fig. III-13. Mise en place des gommettes permettant l'intégration d'une distance de référence pour le post-traitement. 119

Fig. III-14. Protocole de prises de vue photographiques destinées à la modélisation d'une section d'édifice. 120

Fig. III-15. Paramètres choisis pour l'alignement des photographies de la surface étudiée. 121

Fig. III-16. Paramètres retenus pour la construction de la géométrie (seconde procédure de l'étape de modélisation). 121

Fig. III-17. Paramètres retenus pour l'application de textures sur les modèles. 122

Fig. III-18. Protocole de l'étape de quantification réalisée sur le logiciel ArcGis. 123

Fig. III-19. Exemple de vérification de surface de référence sur ArcScene. 124

Fig. IV-1. Carte de Becán dressée par la *Carnegie Institution*, modifiée pour localiser les groupes identifiés lors de la redécouverte du site (Ruppert et Denison, 1943). 131

Fig. IV-2. Structure I de Becán avant (à gauche) et après (à droite) les travaux réalisés en 1982 (Piña Chan, 1983). 134

Fig. IV-3. Structure II de Becán au début des travaux de dégagement (à gauche), et panneaux à damiers après leur reconstruction (à droite) (Piña Chan, 1983). 134

Fig. IV-4. Structure II de Becán après les opérations de Bueno (Bueno et Gutierrez, 1985). 135

Fig. IV-5. Dégagement et consolidation autour de la structure V-B à Becán (Bueno et Gutierrez, 1985). 135

Fig. IV-6. Construction en cours (à gauche) et finalisée (à droite) de la terrasse d'accès au niveau supérieur de la structure I (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004). 137

Fig. IV-7. Vue frontale de la structure I-A avant (a) et après intervention (b), et vue intérieure d'une chambre du niveau inférieur avant (c) et après (d) remontage de la voûte et construction de la terrasse (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004). 138

Fig. IV-8. Linteaux de soutènement incorporés aux accès des chambres inférieures de la structure I-A (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004). 138

Fig. IV-9. Clichés des panneaux à damiers de la façade est de la structure II avant et après leur restauration (Campaña Valenzuela *et al.*, 2004). 139

Fig. IV-10. Clichés des façades est (à gauche) et ouest (à droite) de la structure I de Xpuhil avant les travaux de 1982 (Piña Chan et Landa, 1983). 142

Fig. IV-11. Consolidation des chambres sud de la structure I de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983). 142

Fig. IV-12. Restauration achevée des éléments iconographiques de la façade est de la structure I de Xpuhil (Piña Chan et Landa, 1983). 143

Fig. IV-13. La une du *New York Times* lors de la redécouverte du site de Río Bec, en 1973 145

Fig. IV-14. Clichés de 6N1 avant (a) et après (b) les opérations de Peña Castillo en 1984, restauration et consolidations sur la façade est (c) et sur les faux temples (d) (Peña Castillo *et al.,* 1984). 146

Fig. IV-15. Croquis préliminaire au dégagement de 5N2 en 2004 (dessin de G. Marchand, dans Michelet *et al.,* 2013). 148

Fig. IV-16. Clichés de la tour nord-est de 5N2 avant (à gauche), pendant (au centre), et après (à droite) les opérations de la cinquième saison du Projet Río Bec en 2006 (Michelet *et al.,* 2007). 149

Fig. IV-17. Clichés pré et post-intervention de la structure 7N1 du groupe D (Michelet *et al.,* 2007). 150

Fig. IV-18. De gauche à droite : progression du dégagement de la tour nord-ouest de 5N2 en 2007 (Michelet *et al.,* 2008). 151

Fig. IV-19. Restitution des voûtes sur les chambres de 5N2 en 2007 (Michelet *et al.,* 2008). 151

Fig. IV-20. Typologie des interventions mentionnées dans les rapports de fouilles et de restauration concernant le secteur Río Bec. 153

Fig. IV-21. Chronologie synthétique des interventions sur le site de Becán. 156

Fig. IV-22. État initial du site de Xpuhil. 157

Fig. IV-23. Chronologie synthétique des interventions sur le site de Xpuhil. 158

Fig. IV-24. Synthèse de la première phase d'intervention sur le site de Río Bec (1973-1984). 160

Fig. IV-25. Synthèse des interventions sur le site de Río Bec effectuées dans le cadre du projet éponyme (2002-2005). 160

Fig. IV-26. Synthèse des interventions sur le site de Río Bec effectuées dans le cadre du projet éponyme (2006-2008). 161

Fig. IV-27. Diagramme de synthèse des trajectoires d'intervention des structures étudiées. 162

Fig. IV-28. Classification des structures étudiées en fonction de leur durée d'exposition post-dégagement et de leur degré d'intervention : résultat du partitionnement en k-moyennes par le critère Trace(W). 163

Fig. V-1. Croquis de localisation de la carrière à proximité de 5N2 à Río Bec (modifié d'après Michelet *et al.,* 2013) et aperçu de l'endroit en question. 169

Fig. V-2. Modalités de ruissellement sur une structure hypothétique du Río Bec en coupe transversale, regroupant les cas de figures rencontrés dans le secteur. 170

Fig. V-3. Homogénéité macroscopique des matériaux de construction dans le secteur Río Bec sur le site éponyme (a et b), à Becán (c), et à Xpuhil (d). 172

Fig. V-4. Coupe transversale schématique des murs de maçonnerie du secteur Río Bec. 173

Fig. V-5. Organismes colonisateurs sur les structures du secteur Río Bec. Biofilms cyanobactériens (a), algaires *Trentepohlia sp.* (b), muscinaux (c) et lichéniques (d). 174

Fig. V-6. Diffractogramme des analyses de cristallographie par rayons X sur les quatre échantillons de matériaux de construction retenus. 175

Fig. V-7. Vue d'ensemble de l'échantillon XPU-06 observé en lumière naturelle, montrant le faciès caliche et la diversité des oncolithes. 177

Fig. V-8. Oncolithes (cerclés de jaune) observés en lumière naturelle dans l'échantillon XPU-09, et porosité tubulaire se développant de manière préférentielle autour des agrégats. 178

Fig. V-9. Structure d'ensemble de l'échantillon BEC-06, observé en lumière naturelle, montrant la structure en mosaïque avec l'alternance de niveaux micritiques et microsparitiques. 179

Fig. V-10. Trames de dolosparite observées en lumière naturelle (à gauche) et masse de dolosparite observées en lumière polarisée (à droite) dans l'échantillon BEC-01. 179

Fig. V-11. Argiles (cerclées de vert) et grains de calcite (cerclés de rouge) observés en lumière naturelle (en haut) et en lumière polarisée (en bas) dans l'échantillon RB-01. 180

Fig. V-12. Variabilité des faciès carbonatés dans les échantillons observés en lames minces. 181

Fig. V-13. Analyses quantitatives de porosité par imagerie informatisée sur les scans figurant au bas de la figure (les « + » indiquent vers quel faciès tend l'échantillon). 183

Fig. V-14. Évolution des températures enregistrées sur la façade sud de la structure I de Xpuhil. 185

Fig. V-15. Évolution annuelle de l'humidité relative enregistrée sur la structure I de Xpuhil. 187

Fig. V-16. Schéma synthétique de la saisonnalité des paramètres climatiques. 188

Fig. V-17. Variations annuelles des amplitudes hygrothermiques journalières au cours de la saison sèche (1), de la saison des pluies (2), et de la saison de transition (3). 190

Fig. V-18. Traitement statistique des températures mesurées sur la structure I de Xpuhil, en fonction des quatre expositions. 192

Fig. V-19. Traitement statistique de l'humidité relative mesurée sur la structure I de Xpuhil, en fonction des quatre expositions. 193

Fig. V-20. Synthèse du couplage des données de température et d'humidité relative sur les différentes expositions de la structure I de Xpuhil. 194

Fig. V-21. Comparaison des températures enregistrées sur la façade sud de la structure I de Xpuhil (ambiance dégagée) et sur la façade sud de la structure Xpuhil II (ambiance forestière). 196

Fig. V-22. Comparaison des taux d'humidité relative enregistrés sur la façade sud de la structure I de Xpuhil (ambiance dégagée) et sur la façade sud de la structure Xpuhil II (ambiance forestière). 197

Fig. V-23. Synthèse du couplage des données de température et d'humidité relative sur les façades sud des structures I de Xpuhil et Xpuhil II. 198

Fig. VI-1. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées à Becán. 205

Fig. VI-2. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées à Xpuhil. 206

Fig. VI-3. Cartographie de l'état de conservation des parements sur les structures sélectionnées sur le site éponyme de Río Bec. 207

Fig. VI-4. Comparaison de l'état de conservation des parements sur les trois sites étudiés. 208

Fig. VI-5. Signatures érosives relevées sur les parements des trois sites d'étude. 209

Fig. VI-6. Colonisation biologique par les différents organismes et taux de recouvrement (T.R.V.) relevés sur les structures étudiées. 210

Fig. VI-7. Espace factoriel et *scree plot* de l'analyse des correspondances multiples pratiquée sur le jeu de données de l'ensemble des parements du secteur. 212

Fig. VI-8. Décomposition, pour chaque variable étudiée, de l'espace factoriel obtenu par ACM sur l'ensemble des parements des structures étudiées. 213

Fig. VI-9. Les tours nord-est (a) et nord-ouest (b) de la structure 5N2 à Río Bec. 216

Fig. VI-10. Chronologie des interventions sur les différents éléments constitutifs des tours jumelles de la structure 5N2 à Río Bec. 217

Fig. VI-11. Évaluation de l'état de conservation des éléments architecturaux de la tour nord-est de la structure 5N2 à Río Bec. 218

Fig. VI-12. Évaluation de l'état de conservation des éléments architecturaux de la tour nord-ouest de la structure 5N2 à Río Bec. 219

Fig. VI-13. Localisation du mur de la structure V-A à Becán. 220

Fig. VI-14. Dimensions, morphologie et parties distinctes identifiées sur le mur de la structure V-A à Becán. 221

Fig. VI-15. Spatialisation de l'état de conservation des blocs du mur de la structure V-A de Becán. 222

Fig. VI-16. Spatialisation des signatures érosives relatives à la dissolution sur le mur de la structure V-A de Becán. 223

Fig. VI-17. Spatialisation des signatures érosives relatives au creusement sur le mur de la structure V-A de Becán. 223

Fig. VI-18. Spatialisation des signatures érosives relatives au délitage sur le mur de la structure V-A de Becán. 224

Fig. VI-19. Spatialisation des signatures érosives relatives à la desquamation sur le mur de la structure V-A de Becán. 224

Fig. VI-20. Comparaison de l'état de conservation des parements en fonction des différentes parties de parement identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán. 225

Fig. VI-21. Comparaison des signatures érosives observées sur les différentes parties identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán. 226

Fig. VI-22. Analyses en composantes principales des variables étudiées sur les blocs du mur de la structure V-A de Becán. 227

Fig. VI-23. Comparaison des températures enregistrées pendant la semaine du 11 au 17 mars 2013 sur le mur de la structure V-A de Becán. 229

Fig. VI-24. Comparaison des taux d'humidité relative enregistrés pendant la semaine du 11 au 17 mars 2013 sur le mur de la structure V-A de Becán. 230

Fig. VI-25. Couplage des données enregistrées pendant une année complète sur les différentes parties du mur de la structure V-A de Becán. 231

Fig. VI-26. Localisation et aperçu des panneaux à damiers de la structure II de Becán. 232

Fig. VI-27. Localisation et aperçu des panneaux à damiers de la structure 6N1 de Río Bec. 233

Fig. VI-28. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la structure II de Becán. 234

Fig. VI-29. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur le panneau RIO-01. 235

Fig. VI-30. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la façade orientale de la structure 6N1 de Río Bec. 236

Fig. VI-31. Spatialisation des degrés d'érosion chimique et mécanique sur les panneaux à damiers de la façade sud de la structure 6N1 de Río Bec. 237

Fig. VI-32. Profils d'érosion chimique des panneaux à damiers étudiés. 239

Fig. VI-33. Profils d'érosion mécanique des panneaux à damiers étudiés. 240

Fig. VI-34. Analyse en composantes principales des variables étudiées sur les panneaux à damiers du secteur Río Bec. 241

Fig. VII-1. Localisation et clichés des fenêtres de quantification ouvertes sur le site de Becán. 246

Fig. VII-2. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur le site de Becán. 247

Fig. VII-3. Localisation des fenêtres de quantification ouvertes sur le site archéologique de Xpuhil. 249

Fig. VII-4. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur le site de Xpuhil. 249

Fig. VII-5. Localisation des fenêtres photogrammétriques sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec. 251

Fig. VII-6. Retrait moyen et maximum calculé sur les nuages de points obtenus par photogrammétrie sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec. 252

Fig. VII-7. Fenêtre de quantification TA3 : cliché de la surface étudiée (à gauche) et résultat de l'opération de quantification montrant le retrait calculé par photogrammétrie (à droite). 253

Fig. VII-8. Localisation et vue d'ensemble du mur de la structure V-A de Becán 254

Fig. VII-9. Différentes parties identifiées sur le mur de la structure V-A de Becán 254

Fig. VII-10. Résultats de la quantification de l'érosion sur les trois parties identifiées du mur de la structure V-A de Becán. 255

Fig. VII-11. Photographies du mur de la structure V-A de Becán (encadré en rouge) lors des interventions de Bueno en 1985 (Bueno et Gutierrez, 1985). 256

Fig. VIII-1. Interface de XPU-06, montrant les macropores résultant de la chute des oncolithes après la dissolution préférentielle de la matrice micritique, observée en lumière naturelle. 266

Fig. VIII-2. Schéma de la détérioration des matériaux de construction étudiés selon la progression de l'érosion préférentielle. 267

Fig. VIII-3. Observation en lame mince de ponts (a) et de nids (b) de nano-aiguilles de calcite sur l'échantillon XPU-06 en lumière polarisée. 269

Fig. VIII-4. Macropore entièrement recristallisé par des nano-aiguilles de calcite, observé en lumière polarisée sur l'échantillon RB-01 269

Fig. VIII-5a. Observations en microscopie électronique de calcite aciculaire dans la porosité de l'échantillon XPU-07. 270

Fig. VIII-5b. Vue de la surface de l'échantillon XPU-07 observé par microscopie électronique, montrant l'absence de structures organiques vivantes. 270

Fig. VIII-6. Imbrication des faciès et traduction en termes d'érosion différentielle dans un matériau de construction hypothétique. 271

Fig. VIII-7. Schéma synthétique de la saisonnalité des paramètres climatiques. 273

Fig. VIII-8. Synthèse des facteurs intrinsèques et extrinsèques déterminant le *modus operandi* de la détérioration des calcaires monumentaux du secteur Río Bec. 278

Fig. VIII-9. Proposition de *modus operandi* de l'érosion des calcaires monumentaux du secteur Río Bec, montrant pour chaque étape les processus impliqués en fonction des paramètres climatiques. 280

Fig. VIII-10. Stages progressifs de succession végétale du consortium algues roses-lichens blancs-mousses, identifié dans le secteur Río Bec par corrélation des taux de recouvrement végétal. 284

Fig. VIII-11. Mise en évidence du contraste de conservation en fonction de la colonisation biologique sur la fenêtre XPU-16, sur le site de Xpuhil. 287

Fig. VIII-12. Classification établie lors de l'étape d'anamnèse des structures. 289

Fig. VIII-13. État de conservation des parements des structures de chaque groupe défini en fonction des trajectoires d'intervention. 290

Fig. VIII-14. Signatures érosives relevées sur les parements des structures selon la classification définie lors de l'étape d'anamnèse. 291

Fig. VIII-15. Parement correspondant à la fenêtre photogrammétrique XPU-01 avec mise en évidence des reliquats de ciment (en gris), des pierres affectées par le délitage (D) et le creusement (C). 294

Fig. VIII-16. Parement correspondant à la fenêtre photogrammétrique XPU-01 avec mise en évidence des reliquats de ciment (en gris), des pierres affectées par le délitage (D) et le creusement (C). 295

Fig. VIII-17. Présentation du mur de la structure V-A de Becán. 297

Fig. VIII-18. Cartographie des effets microtopographiques identifiés sur le site éponyme de Río Bec. 299

Fig. IX-1. Sources utilisables dans le cadre de la démarche d'anamnèse (Fitzner, 2004). 302

Fig. IX-2. Fonctionnement de l'outil de gestion issu de la démarche d'anamnèse. 306

Fig. IX-3. Comparaison des nano-aiguilles observées en lames minces (a) et au MEB (c) par Bajnozxi et Kovács-Kis (2006) ; et celles observées dans le présent travail (b et d). 314

Fig. IX-4. (a) Accélération de l'érosion imputable à un rejointoiement au ciment sur les grès irlandais (Dotter *et al.,* 2009) et sur la structure I de Xpuhil (b). 318

Table des tableaux

Tab. I-1. Différentes formes de recouvrements et signatures érosives en fonction des agents biologiques à la surface des monuments historiques en milieu tropical (d'après Kumar et Kumar, 1999). 37

Tab. II-1. Principales essences retrouvées dans les communautés végétales les plus communes du secteur Río Bec (d'après Dussol *et al.,* 2016). 70

Tab. III-1. Récapitulatif des principales collaborations développées lors des recherches. 93

Tab. III-2. Récapitulatif des mesures effectuées pour le monitoring climatique. 104

Tab. III-3. Récapitulatif des variables étudiées en fonction des individus statistiques observés lors du diagnostic de la dynamique érosive. 109

Tab. III-4. Analyses statistiques pratiquées sur les différents éléments observés en fonction des variables étudiées. 116

Tab. IV-1. Synthèse des interventions recensées dans les rapports disponibles sur le site de Becán. 156

Tab. IV-2. Synthèse des interventions recensées dans les rapports disponibles sur le site de Xpuhil. 157

Tab. IV-3. Synthèse des interventions recensées sur le site de Río Bec. 159

Tab. V-1. Tableau récapitulatif des observations en lames minces sur les échantillons prélevés. 181

Tab. VI-1. Calcul des pourcentages pour chaque d'érosion chimique et mécanique sur l'ensemble des panneaux à damiers étudiés. 238

Tab. VII-1. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur le site de Becán. 248

Tab. VII-2. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur le site de Xpuhil. 250

Tab. VII-3. Taux de retrait obtenus par photogrammétrie sur les fenêtres ouvertes sur la tour nord-est de la structure 5N2 de Río Bec. 252

Tab. VII-4. Taux de retrait annuel calculé en fonction des deux hypothèses de dégagement du parement. 256

Table des matières

Avant-propos **5**

Sommaire **9**

Introduction **13**

PARTIE 1 : Présentation **23**

Chapitre I – De l'érosion des calcaires monumentaux en contexte tropical **25**

1. Évolution récente du paysage de la recherche sur l'érosion de la pierre monumentale **25**
2. Durabilité et vulnérabilité des calcaires monumentaux **29**
2.1. Milieu urbain, pollution atmosphérique et pluies acides 30
2.2. Transferts hydriques, cristallisation des sels et rôle des argiles 33
3. L'appréciation du rôle des microorganismes **35**
3.1. Biodétérioration : organismes impliqués et processus associés 35
3.2. Bioprotection et bioremédiation 39
4. Forçage anthropique induit par les interventions humaines **42**
4.1. Interventions directes 43
4.2. Interventions indirectes 45

Conclusion du chapitre 1 ..... **50**

Chapitre 2 – Des ruines mayas du secteur Río Bec : environnement physique et contexte archéologique **51**

1. Les Basses Terres Centrales, au cœur de la péninsule du Yucatán **52**
1.1. Contexte géologique et géomorphologique 55
1.1.1. Cadre géologique général de la péninsule du Yucatán 55
1.1.2. Les formations superficielles du secteur Río Bec 57
1.1.3. Relief, sol, et réseau hydrographique 65
1.2. Contexte bioclimatique 66
1.2.1. Climat 66
1.2.2. Végétation 69
1.2.3. Micro-organismes 71
2. Le secteur Río Bec : une exception archéologique **73**
2.1. Repères chronologiques et différentes phases d'occupation 74
2.2. Une organisation socio-politique particulière au sein de l'aire culturelle maya 76
2.3. Le style architectonique Río Bec 79

3. Les sites archéologiques retenus 87
3.1. Becán 88
3.2. Xpuhil et Xpuhil II 89
3.3. Río Bec 90

Conclusion du chapitre II 92

Chapitre 3 – Méthodologie 93

1. Anamnèse des structures étudiées 94
1.1. Recherches en archives 94
1.2. Classification des trajectoires d'intervention 94
2. Caractérisation des facteurs de contrôle 96
2.1. Analyses pétrographiques et études de matériaux 96
2.1.1. Liste des échantillons et stratégie de collecte 96
2.1.2. Observations en lames minces 99
2.1.3. Analyses de porosité 100
2.1.4. Analyses géochimiques par diffraction des rayons X 101
2.1.5. Microscopie électronique à balayage 101
2.2. Monitoring des paramètres climatiques 102
2.2.1. Matériel utilisé 102
2.2.2. Stratégie de collecte 104
2.2.3. Traitement des données 107
3. Diagnostic de la dynamique érosive 108
3.1. Catégorisation des formes et intensités d'érosion et de colonisation biologique 109
3.2. Spatialisation des résultats 115
3.3. Analyses statistiques 116
4. Quantification de l'érosion 118
4.1. Photogrammétrie multi-images 118
4.2. Acquisition des données sur le terrain 119
4.3. Post-traitement des données 120
4.3.1. Étape de modélisation 120
4.3.2. Étape de quantification 122

Conclusion du chapitre 3 125

PARTIE 2 : Résultats 127

Chapitre IV – Anamnèse des structures étudiées 129

1. Les sites archéologiques de Becán et Xpuhil 130
1.1. Becán 130
1.1.1. Découverte et observations initiales 131
1.1.2. Dégagement des structures et consolidations 133
1.1.3. Restaurations ultérieures 135
1.2. Xpuhil 140
1.2.1. Découverte et observations initiales 140
1.2.2. Dégagement des structures et consolidations 141
2. Río Bec, le site éponyme 144

2.1. Découverte et premières opérations 144
2.2. Le projet Río Bec (2002-2010) 147
3. Classification des structures et définition de trajectoires d'intervention 152
3.1. Typologie des interventions 153
3.2. Synthèse des interventions sur les structures sélectionnées 155
3.3. Classification des structures étudiées 162

Conclusion du chapitre IV 165

Chapitre V – Caractérisation des facteurs de contrôle 167

1. Caractérisation des facteurs de contrôles intrinsèques 168
1.1. Approche descriptive des matériaux de construction 169
1.1.1. Morphologie des structures : de l'architectonique au système de pentes 169
1.1.2. Description macroscopique des matériaux 171
1.1.3. Altérations chromatiques et biofilms épilithiques 173
1.2. Analyses pétrographiques et évaluation de la durabilité-vulnérabilité des matériaux 174
1.2.1. Composition chimique des matériaux 175
1.2.2. Variabilité des faciès carbonatés identifiés 176
1.2.3. Porosité des matériaux de construction 182
2. Caractérisation des facteurs de contrôle extrinsèques 184
2.1. Saisonnalité des paramètres climatiques 184
2.2. Le rôle de l'orientation des structures 191
2.3. Ambiances forestières et dégagées 195

Conclusion du chapitre V 200

Chapitre VI – Diagnostic de la dynamique érosive 203

1. Les parements du secteur Río Bec 204
1.1. Cartographie de la dynamique érosive 204
1.1.1. État de conservation des parements 205
1.1.2. Formes et signatures érosives 208
1.1.3. Colonisation biologique 210
1.2. Analyses statistiques multivariées 212
2. Les tours de la structure 5N2 de Río Bec 216
2.1. La tour nord-est 218
2.2. La tour nord-ouest 218
3. Le mur de la structure V-A de Becán 220
3.1. Spatialisation des résultats 221
3.2. Analyses statistiques 225
3.3. Paramètres climatiques 228
4. Les panneaux à damiers 232
4.1. Spatialisation des résultats 233
4.2. Analyses statistiques 238

Conclusion du chapitre VI 242

Chapitre VII – Quantification de l'érosion 245

1. Fenêtres de quantification ciblées 246
1.1. Becán 246
1.2. Xpuhil 248
2. La tour nord-est de Río Bec 250
3. Le mur de la structure V-A de Becán 254

Conclusion du chapitre VII 258

PARTIE 3 : Discussion et conclusions 261

Chapitre VIII – Interprétation des résultats 263

1. Évaluation de la durabilité des matériaux de construction étudiés 264
1.1. Variabilité des faciès : la durabilité des matériaux entre érosion différentielle et biominéralisation 265
1.1.1. L'érosion différentielle : le facteur de vulnérabilité principal 266
1.1.2. Néoformation de calcite par biominéralisation : un facteur de durabilité 268
1.2. Influence des paramètres climatiques sur l'efficacité des processus érosifs 272
1.2.1. Saisonnalité de l'efficacité des processus 273
1.2.2. Morphologie des structures et ambiances climatiques forestières ou dégagées 275
1.2.3. Le gradient hygrothermique des orientations 276
2. Modus operandi de l'érosion des matériaux de construction dans le secteur Río Bec 278
2.1. Un relai de processus en quatre étapes 279
2.2. Le rôle de la colonisation biologique 282
2.2.1. Logique de distribution des microorganismes et processus associés 283
2.2.2. Biodétérioration versus bioprotection 285
3. Impact des interventions humaines : du modus operandi aux crises érosives localisées 288
3.1. Trajectoires d'interventions et modalités d'érosion 289
3.2. Interventions ponctuelles et crises érosives localisées 293
3.2.1. Rejointoiements au ciment 294
3.2.2. Effet d'abri des voûtes partiellement reconstruites 296

Conclusion du chapitre VIII 300

Chapitre IX – Discussion 301

1. Anamnèse des structures : retour sur expérience 302
1.1. La classification des trajectoires d'intervention des structures : une tentative à améliorer 303
1.2. Synthèse et cartographie des interventions : vers un outil de gestion du patrimoine ? 305

2. Légitimité du modus operandi proposé : entre limites méthodologiques et expertise géomorphologique 309
2.1. Pierre « palimpseste » et non-linéarité des taux d'érosion 309
2.2. Expertise géomorphologique 312
2.2.1. Facteurs intrinsèques 312
2.2.2. Facteurs extrinsèques 315
3. Impact des interventions humaines : le forçage anthropique en question 317
3.1. Les rejointoiements au ciment : modification des facteurs intrinsèques 318
3.2. Opérations de dégagement et de libération : modification des facteurs extrinsèques 320
3.3. Le mur de la structure V-A de Becán : bioprotection et rôle de la voûte reconstruite 322
3.3.1. Un biofilm protecteur 322
3.3.2. La reconstruction des voûtes en question 324

Conclusion du chapitre IX 327

Épilogue 329

Bibliographie 333

Annexes 349

Annexe I : Observations en lames minces des matériaux du secteur Río Bec 351

Annexe II : Projet de recherche présenté à l'INAH en janvier 2013 363

Table des figures 395

Table des tableaux 407

Table des matières 409

Résumé

Les sites archéologiques mayas du secteur Río Bec se caractérisent par un enjeu de conservation élevé, en raison de la faible durabilité de leurs matériaux de construction calcaires ainsi que du haut niveau de stress climatique auquel ils sont soumis. De surcroît, les interventions humaines pratiquées sur les vestiges du secteur depuis leur redécouverte sont susceptibles de constituer un forçage anthropique sur les modalités et les vitesses d'érosion, que nous avons cherché à caractériser, spatialiser, et quantifier. Les différentes étapes de travail intègrent entre autres des recherches en archives, de la cartographie par SIG, des analyses pétrographiques, et des techniques de modélisation 3D par photogrammétrie. Les principaux résultats montrent que les interventions humaines dont les monuments ont fait l'objet modifient bien plus les modalités de la dynamique érosive que la simple exposition des structures aux agents bioclimatiques. Les effets délétères de certaines interventions, telles que les rejointoiements intégrant du ciment, a été démontré, et le rôle des organismes colonisateurs de l'épiderme rocheux a été apprécié. Enfin, de nouvelles pistes de réflexion ont également été apportées sur l'impact de reconstructions très localisées pouvant commander des régimes d'érosion très disparates à quelques mètres d'intervalle.

Mots-clés : pierre monumentale, érosion, sites archéologiques, mayas, calcaire, interventions humaines

Abstract

The Mayan archaeological sites in the Río Bec sector are characterized by a high conservation challenge, due to the low durability of limestone built materials and to the high level of atmospheric stresses to which they are being subjected. Moreover, human interventions carried out on built heritage in the sector since its rediscovery are likely to constitute an anthropogenic forcing on weathering processes and rates, which we aimed to identify, spatialize and quantify. Different steps of this research include archives work compilation, GIS mapping, petrographic analysis and 3D modelling by photogrammetry. Main results show that human interference is much more likely to modify weathering processes and rates than the mere exposure of stone materials to atmospheric agents. The harmful effects of some interventions, such as cement repointing, have been demonstrated, and the effects of colonizing organisms on the stone surface have been assessed. Finally, new insights and perspectives have been provided on very localized restorations causing drastic changes of weathering regimes within a very restricted area.

Keywords: cultural stone, weathering, Mayan, built limestone, human interference