

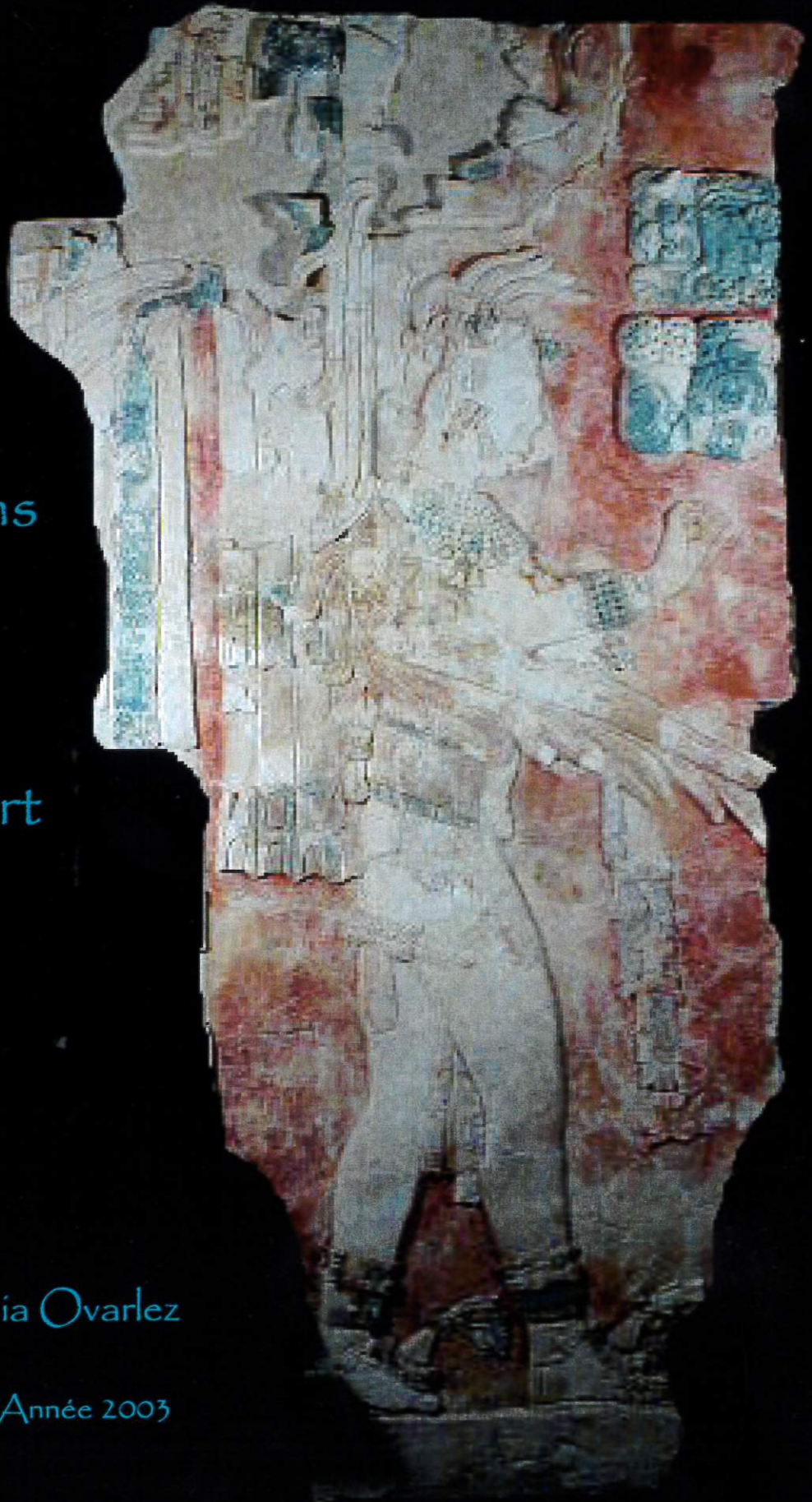
- École d'Art d'Avignon -  
- Département Conservation-Restauration d'Œuvres Peintes -

«YAX»

Fabrications  
et  
utilisations  
des bleu-vert  
mayas

Sonia Ovarlez

Année 2003



- École d'Art d'Avignon -  
- Département Conservation-Restauration d'Œuvres Peintes -

« YAX »

# Fabrications et utilisations des bleu-vert mayas

Sonia Ovarlez

Mémoire de fin d'étude, année 2003, dirigé par :

Catherine Vieillescazes, Maître de conférences à l'Université d'Avignon

François Delamare, Directeur de recherche de l'École des Mines de Paris

Thierry Martel, restaurateur

Tatiana Falcon Alvarez, Directrice du Laboratoire de Diagnostic sur les œuvres d'art  
de México

751 DETA



F 1232  
11 323



MINISTÈRE DES AFFAIRES  
ÉTRANGÈRES





A mes parents,







# TABLE DES MATIERES

Remerciements	p 10
Avant propos	p 14
Introduction	p 19

## Première partie

### Contexte, langage esthétique et recettes

#### Chapitre 1

Le bleu maya	p 31
Introduction	

- 1.1. Le bleu maya en Mésoamérique. Etude bibliographique. I – Histoire de la caractérisation du bleu maya . . . . . p 33
- 1.2. Préparation des couleurs par les indigènes. Etude bibliographique. II – Les bleus dans les textes du XVI<sup>e</sup> siècle. . . . . p 41
- 1.2. Sur la rencontre des argiles et de l'indigo . . . . . p 53
- 1.3. De l'emploi des couleurs dans le monde préhispanique ou discussion sur les peintres mayas . . . . . p 61
- 1.4. Le bleu et le symbolisme des couleurs préhispaniques . . . . . p 69

#### Chapitre 2

Préparations des bleus mayas	p 79
Introduction	

- 2.1. Les matières premières . . . . . p 83
  - 2.1.1. L'indigo, or bleu des anciennes civilisations
  - 2.1.2. L'argile, le support indispensable
  - 2.1.3. La cuisson ou le secret du bleu maya
- 2.2. Premières expérimentations : voie sèche ou voie humide ? . . . . . p 99
  - 2.2.1. Les recettes modernes
  - 2.2.2. Fabrication du bleu maya par la voie humide
  - 2.2.3. Fabrication du bleu maya par la voie sèche
  - 2.2.4. Voie sèche ou humide : la cuisson
  - 2.2.5. Voie sèche : détermination de la quantité d'indigo non fixée
  - 2.2.6. Influence du broyage sur la couleur
- 2.3. Variation sur le thème des tonalités : vers un nuancier de bleus . . . . p 111
  - 2.3.1. Réalisation d'un nuancier bleu
  - 2.3.2. Recettes et couleur
  - 2.3.3. Influence de la nature de l'argile
  - 2.3.4. Etude colorimétrique du nuancier

## Deuxième partie

### Etude scientifique des bleus mayas et des techniques picturales

#### Chapitre 3

Corpus des bleus mayas étudiés et méthodes d'approches p 129

#### Chapitre 4

Analyse physico-chimique p 151

Introduction

- 4 .1. Première approche des techniques picturales : étude de coupes transversales en microscopie optique .....p 155
- 4 .2. Quand la science prend l'empreinte des bleus mayas .....p 170
  - 4 .2 .1. Spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier FTIR
  - 4 .2 .2. Microscopie Electronique à Balayage MEB et microanalyse élémentaire EDX
- 4 .3. Synthèse des résultats - Les techniques picturales mayas... .....p 211

## Troisième partie

### Etude colorimétrique

#### Chapitre 5

Les bleu-vert des peintures murales de l'aire maya sous « l'œil » du colorimètre p 223

Introduction

- 5 .1. Etendue de la palette du peintre maya. .... p 227
- 5 .2. Code de la couleur .....p 239
- 5 .3. Comparaison des bleu-vert mayas avec le nuancier ..... p 251

Conclusion p263

Bibliographie p 273





---

# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Catherine Vieillescazes, maître de conférences à l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, responsable du département de Chimie Appliquée à l'Art et l'Archéologie, qui a accepté de suivre ce mémoire, qui m'a permis d'intégrer son équipe et de travailler durant ces cinq dernières années sur des sujets qui me passionnent puisqu'ils touchent à l'art. Merci, Cathie, de ta confiance, de tes conseils et de l'opportunité que tu m'as donnée de travailler sur le bleu maya.

Je teins également à remercier chaleureusement le Professeur François Delamare, Directeur de recherche à l'Ecole Doctorale Sciences Fondamentales et Appliquées de l'Ecole des Mines de Paris, sans qui ce mémoire ne serait pas ce qu'il est. Merci, monsieur Delamare, pour votre soutien, votre gentillesse, votre enthousiasme, votre disponibilité et vos corrections. Je teins à vous exprimer ici ma profonde gratitude pour m'avoir fait partager votre expérience et votre passion pour les matériaux de la couleur.

Mes remerciements se portent ensuite tout particulièrement vers Bernard Guineau qui m'a guidé et permis de continuer les études entreprises en partageant avec moi ses connaissances et ses relations. Je tiens, monsieur Guineau, à vous adresser ici mes plus vifs remerciements. Votre rencontre à été pour moi un moment important, et je suis très touchée par votre confiance et par la gentillesse dont vous avez fait preuve à mon égard.

Je remercie aussi Michel Garcia qui est à l'origine de cette aventure. Sans qui, je n'aurais peut-être jamais rencontré le bleu maya. Merci, Michel, pour m'avoir fait partager ton expérience et ta passion pour les couleurs végétales, pour ces journées passées à jouer les apprentis - sorciers de la couleur, pour ta disponibilité et ta générosité.

Je tiens à remercier particulièrement, Tatiana Falcon Alvarez, Directrice du Laboratorio de Diagnostico de Obras de Arte de l'Instituto de Investigaciones Estéticas de l'Université Nationale Autonome de México (UNAM) pour son accueil chaleureux au sein de son laboratoire. Merci Tatiana, de m'avoir donné l'opportunité d'approfondir et d'élargir mon étude en mettant à ma disposition toutes les compétences et les moyens nécessaires à son accomplissement. Sans ton soutien, cette étude n'aurait pas eu l'ampleur que je souhaitais lui donner. J'aimerais ici saluer

le travail que tu accomplis au Mexique, ta générosité, ton expérience et ta bonne humeur. *« Tatiana, te agradesco muchissimo de la oportunidad que me das de descubrir tantas cosas y tantas personas maravillosas. Nuestra colaboracion fue muy importante para mi, y una vez mas agradezco tus consejos, tu generosidad, tu confianza y tu entusiasmo. »*

Merci également à Thierry Martel, restaurateur et professeur à l'École d'Art d'Avignon pour avoir suivi mon travail en l'éclairant de ses conseils.

Merci aussi à mes deux autres directrices de stage : Diana Magaloni et Leticia Staines, historiennes de l'art maya de l'Instituto de Investigaciones Esteticas, pour avoir dirigé et suivi avec beaucoup d'intérêt et d'attention le déroulement de cette recherche. Merci Diana, pour ton enthousiasme, ta générosité et pour m'avoir transmis tant de connaissances. Merci Leticia, pour ta disponibilité, ta gentillesse et pour m'avoir guidé dans le monde maya.

Enfin je voudrais remercier toutes les personnes qui ont participé à cette recherche ou qui ont permis qu'elle se réalise :

Tout d'abord, je tiens à remercier particulièrement EGIDE, Centre français pour l'accueil et les échanges internationaux, premier opérateur du ministère des Affaires étrangères pour la gestion des bourses du gouvernement français, pour m'avoir accordé son soutien financier par l'attribution d'une bourse d'étude bilatérale. Merci à Brigitte Lhéritier du ministère des Affaires étrangères et à Sophie Da Silva du centre EGIDE, pour leurs conseils, leur soutien et leur disponibilité.

Merci également, au Secretaria de Relaciones Exteriores de México et à l'Ambassade du Mexique en France, pour leur contribution financière à la bourse. J'adresse de vifs remerciements à Elizabeth Colin, Eva Luz Hernandez de la SRE à México ainsi qu'à Carolina Becquerril et Erika Rebollar de l'Ambassade du Mexique, pour m'avoir guidé et soutenu dans mes démarches.

Merci au Docteur Maria Teresa Urtriarte, directrice de l'Instituto de Investigaciones Esteticas, pour m'avoir accepté au sein de son établissement et mis à notre disposition une camionnette et un chauffeur lors de notre voyage dans l'aire maya .

Merci de tout cœur, à Monique Repoux, pour son dévouement et le temps qu'elle m'a gentiment accordé pour réaliser les analyses MEB/EDX à l'École des Mines de Paris.

Merci à Carole Mathe, Miceäel Hovanessian, Gérald et Annick Culioli du département de Chimie Appliquée à l'Art et l'Archéologie de l'Université d'Avignon pour leur aide, leurs conseils et le temps qu'ils ont volontiers dédié à ma recherche.

Merci à Clothilde Boust, pour son aide et tous ses conseils en colorimétrie.

Merci à Delphine de Blic, pour m'avoir aidé à réaliser le film.

Merci à Sandra Zetina, restauratrice du Laboratorio de Diagnostico de Obras de Arte, pour m'avoir si bien accompagné durant ces quatre mois au Mexique, pour m'avoir fait partager sa bonne humeur et son expérience.

Merci à José Luis Ruvalcaba, pour son accueil chaleureux au sein de l'Instituto de Fisica de l'UNAM. Merci José Luis, pour ton dévouement, ta participation à la réalisation du nuancier et des analyses PIXE, et pour ta gentillesse tout simplement.

Merci à Georgina Güereca, Rosangela Aguirre et Juan Velasco pour m'avoir aidé à réaliser le nuancier.

Merci à Javier Vasquez, chimiste de la Escuela Nacional de Conservacion e Restauracion Manuel del Castillo Negrete de México, pour nos longues discussions autour des bleu-vert mayas et pour m'avoir fait partager sa grande expérience des pigments méso-américains.

Merci à Dulce Maria Grimaldi de la Coordinacion Nacional de Conservacion del Patrimonio Cultural pour ses conseils et sa gentillesse.

Merci à Carolusa Gonzalez, conservatrice de la Biblioteca Nacional de Historia e Antropologia, pour m'avoir offert l'opportunité d'étudier deux codex préhispaniques.

Merci également à Ariadna Cervera, restauratrice ; Eumelia de la photothèque de l'IIE, Jorge Jimenez du Secretaria Tecnico de l'IIE pour leur accueil et leur bonne humeur.

Je teins également à remercier les directeurs des centres régionaux de l'Instituto Nacional de Antropologia e Historia : Laura Pescador Caton au Chiapas, Carlos Vidal Angles au Campêche, Luis Millet Camara au Yucatán et Adriana Velasquez Morlet au Quintana Roo, qui nous ont fourni les autorisations nécessaires pour réaliser cette étude. Merci aussi au Docteur Alejandro Martinez Muriel, coordinateur national d'archéologie et à Joaquin Garcia Barcena, président du conseil d'archéologie.

Merci à tous les archéologues et les directeurs des sites archéologiques pour leur accueil, leur disponibilité et leur contribution logistique. Que tous trouvent ici l'expression de mon amicale reconnaissance : Juan Antonio Ferrer Aguilar, Directeur de la zone archéologique de Palenque et Bonampak ; Ramon Carrasco, directeur de la zone archéologique de Calakmul ; Carlos Peraza, chargé de la zone archéologique de Mayapan ; Carlos Perez Alvarez, chargé de la zone archéologique de Chacmultun ; Peter Shmidt, Directeur de la zone archéologique de Chichen Itza ;

Villebaldo Pech Moo, chargé du site de Chichen Itza ; Gabriel Euan Canul et Francisco Perez Ruiz, archéologues à Chichen Itza ; Luis Alberto Martos Lopez, archéologue chargé de la zone de Rancho Ina – Calica.

Merci à Alejo pour nous avoir gentiment accompagné jusqu'à Bonampak et aidé à monter le matériel au sommet des pyramides. Merci à Pascual, gardien du site, sa femme et ses enfants pour nous avoir offert leur hospitalité. Merci à Pascualito, son fils, pour m'avoir conté tant de légendes mayas et fait découvrir *el conejo en la luna*. Merci à tous les gardiens de sites, que je ne peux citer ici, pour avoir veillé si souvent tard afin de nous laisser terminer notre travail.

Merci à Miguel Angel Quiroz, notre chauffeur

Merci également à Claude Mahieu de l'Oréal et à Hans Christoph Von Imhoff pour leur aide.

Une mention spéciale revient à ma « maman mexicaine », Sylvia Velasco y Levy qui m'a fait l'honneur et la joie de m'accueillir dans sa maison. Merci Sylvia pour tous ces moments de bonheur et de fou rire, pour ton affection, ta générosité et ta confiance. Merci à Juan, Adriana et Kike, pour m'avoir « prêté » leur maman et pour leur dévouement. Merci à toi Juan, pour ta patience, ton aide précieuse, ton soutien et ta présence.

---

Je tiens à remercier affectueusement toutes mes amies, les filles de ma « promo » avec qui j'ai peut-être passé les cinq plus belles années de ma vie. On a grandi ensemble, partagé les bons et les mauvais moments, les doutes, les peurs, les joies. Je remercie la vie de les avoir rencontré et d'avoir fait naître une telle amitié. Merci à Guillemette de Mathan, à Frankline Barrés, à Florence Feuardent, à Pascale Accoyer, à Marie Renoult pour leur amitié, leur soutien, leurs conseils, leurs corrections, leur écoute, leur coups de gueule, leur rires et leurs petits plats. Merci aussi à Marcelle et Frédérique pour leur gentillesse.

Merci Fred, pour ta gentillesse, ton soutien et ta patience durant ces cinq ans.

Merci Laure, pour ta présence et ta complicité.

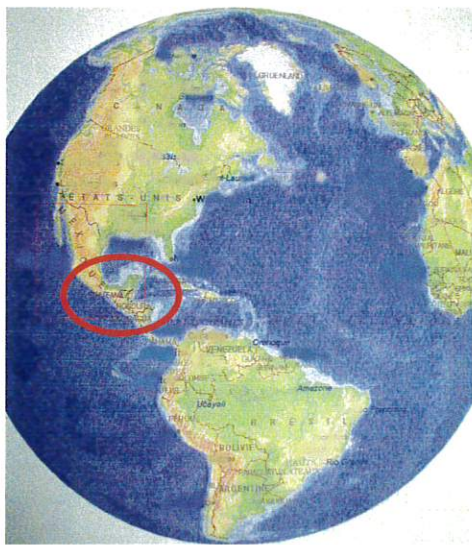
Merci Cécile, pour tes corrections et ta gentillesse

Merci à mes parents pour m'avoir toujours soutenue dans mes choix et permis de vivre mes passions. Merci pour votre affection et votre soutien.

---

## AVANT - PROPOS

**D**e toutes celles qui se sont développées sur le sol du nouveau Monde avant le contact avec les Européens, la civilisation maya est une des plus avancée et des plus complexes ; particulièrement brillante sur les plans intellectuels et artistiques, elle est la seule à avoir créé et maîtrisé une véritable écriture. La Mésoamérique, grande aire culturelle qui s'étend du centre du Mexique au Costa Rica, ne peut être comprise isolée dans son contexte.

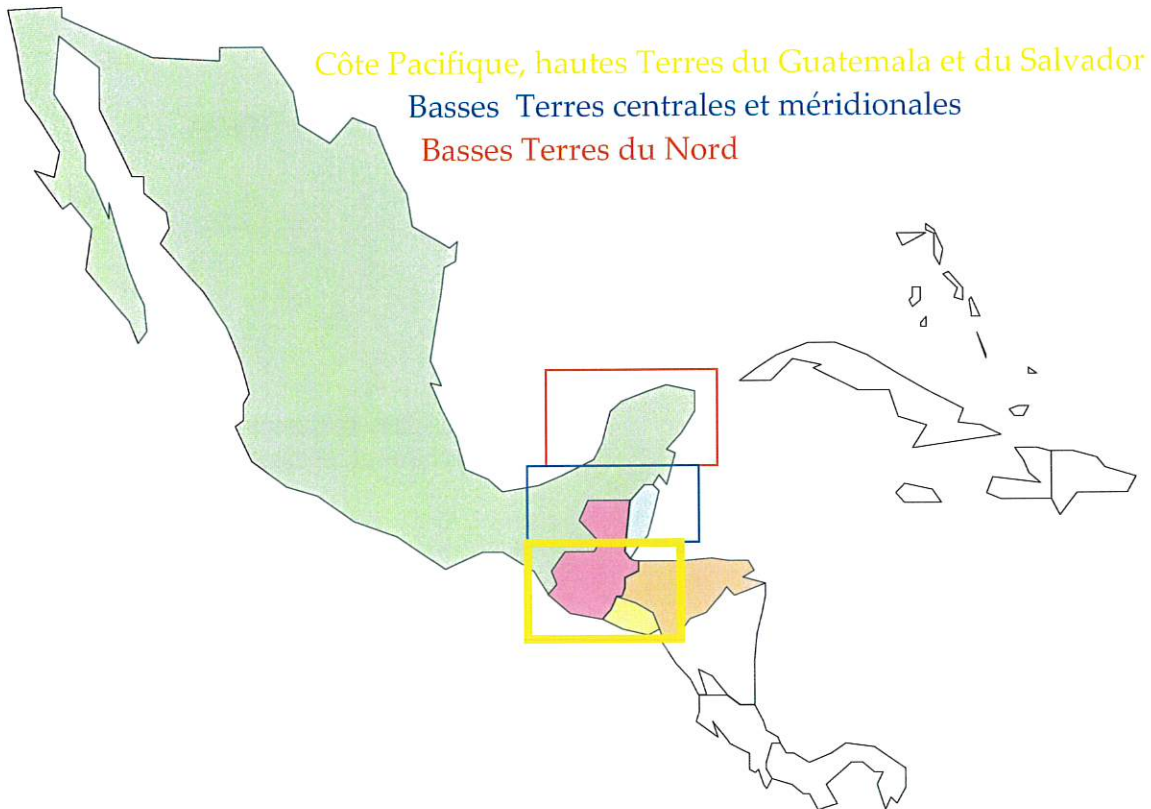


Malgré les grandes divergences entre les civilisations, toutes ont des traits communs qui donnent à l'aire son unité, tant dans le domaine économique que dans les sphères intellectuelles ou artistiques. Ainsi dans l'ensemble des religions méso-américaines, les cérémonies, le culte, la divination dépendent étroitement du calendrier qui combine un cycle solaire approximatif de 365 jours et un cycle cérémoniel de 260 jours ; les lieux de culte sont souvent installés sur des soubassement pyramidaux à degrés ; on sacrifie des êtres humains, et l'autosacrifice a une place exceptionnelle, inégalée ailleurs ; les offrandes d'encens jouent un rôle primordial ; les Méso-américains jouent à la balle, rite plus que jeu.

L'aire maya qui occupe la plus grande partie de l'est de la Mésoamérique, est définie à la fois par la distribution des langues et par celle des ruines laissées par cette civilisation. Ce territoire de 342 000 km<sup>2</sup> comprend l'ensemble de la péninsule du Yucatán, le Guatemala, le Belize, ainsi que l'ouest du Salvador et du Honduras.

Pour rendre compte des différences culturelles sur ce territoire, on distingue au moins trois grandes zones, chacune caractérisée par des formes spécifiques et une trajectoire historique particulière : Côte Pacifique et Hautes Terres du

Guatemala et du Salvador ; Basses Terres centrales et méridionales (Chiapas, Campêche), Basses Terres du Nord (Yucatán, Quintana Roo).



En outre, l'histoire de la civilisation maya a été divisée en grandes périodes appelées **préclassique** (2000 a.C – 250 p.C), **classique** (250 – 950 p.C) et **postclassique** (950 – 1525 p.C), chacune d'elles divisée en ancien, moyen et récent avec parfois des divisions supplémentaires comme pour le classique terminal (cf. tableau au verso).

Cette brève parenthèse historique et géographique va nous permettre d'avoir les repères nécessaires pour développer notre étude.

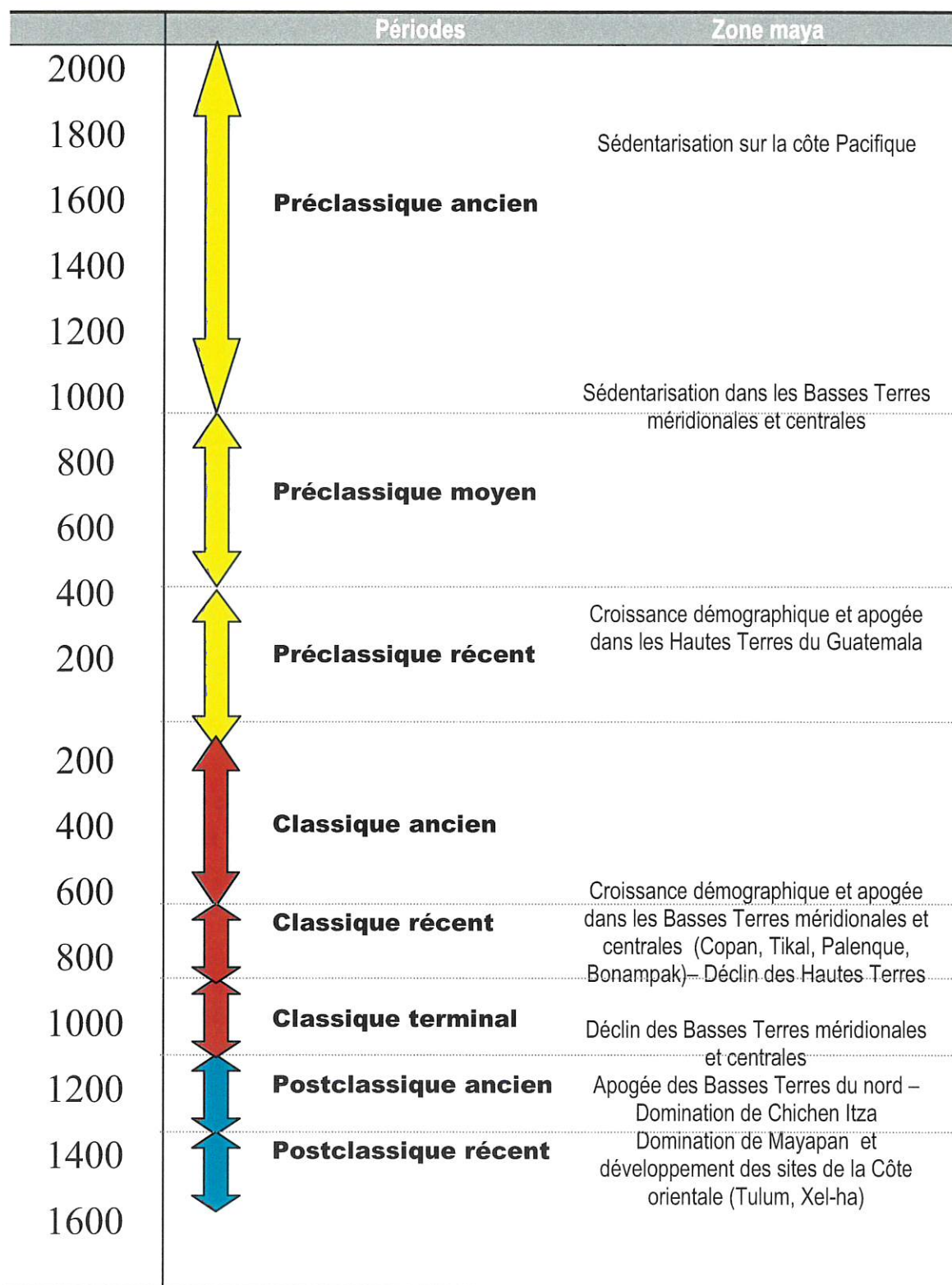


Tableau I : Chronologie et évolution culturelle des Mayas





Palenque, Chiapas, Mexique  
Encensoir, Réserve du musée,  
Classique,  
© photo Sonia Ovarlez

---

# Introduction





Fig.1 : Bonampak, Chiapas  
Chambre 1, mur est  
Classique récent : 600-900 p. C.  
© photo Diana Magaloni, IIE

**E**n langage maya, « Yax » désigne la couleur bleu-vert du pigment bleu maya. Le bleu maya, ou plutôt devrions-nous dire, LES bleus mayas furent largement utilisés dans l'expression plastique de l'art magico - religieux des civilisations préhispaniques. La richesse de la gamme bleu-vert rencontrée dans les peintures murales, céramiques et codex, révèle un perfectionnement de la technique de fabrication qui a bientôt été appliquée à d'autres couleurs, vert, jaune et rouge.

Découvert pour la première fois en 1931, par H. E. Merwin à Chichen Itza, au Yucatán (Mexique), le bleu maya est célèbre pour sa remarquable résistance aux atteintes du temps et de l'environnement. En effet ce pigment artificiel d'origine à la fois minérale et végétale est extraordinairement bien conservé après avoir pourtant traversé les siècles soumis à une très forte humidité et à la chaleur. C'est aussi la raison pour laquelle il résiste particulièrement bien à toutes les tentatives d'analyse physico-chimiques. Le bleu maya est issu du mélange chauffé d'argiles et d'un colorant naturel : l'indigo. C'est là le secret de son extraordinaire stabilité.

La plupart des études sur le bleu maya prennent en considération uniquement ses composantes physico-chimiques. Peu d'entre elles proposent de le mettre en relation avec son contexte culturel, historique et social. Avant d'être le reflet d'une évolution technique, la palette chromatique d'une époque est surtout le reflet des mentalités. Pastoureau<sup>1</sup>, dans son ouvrage, *Bleu : l'histoire d'une couleur*, met l'accent sur ce point : « *c'est la société qui « fait » la couleur, qui lui donne sa définition et son sens, qui construit ses codes et ses valeurs, qui organise ses pratiques et détermine ses enjeux* ». L'étude de la couleur doit être pluridisciplinaire, c'est pourquoi nous avons utilisé les connaissances techniques, historiques et scientifiques, reçues au cours d'un double cursus (Conservation-Restauration d'œuvre peintes et deuxième cycle universitaire en Chimie) pour réaliser cette étude.

C'est ici, à la frontière de deux sciences, que le regard et la sensibilité du restaurateur, sa curiosité et son sens de la matière, sa perception de l'œuvre et ses connaissances techniques sont mis à profit pour mener à bien une recherche et tenter de répondre aux multiples questions qui se posent :

---

<sup>1</sup> PASTOUREAU, M. *Bleu : histoire d'une couleur*, éd. Paris : Seuil, 2000. p. 9.



Fig. 2 : Metztitlan, Hidalgo  
Peintures murales du couvent de Metztitlan où l'on trouve du bleu maya.  
Epoque coloniale, fin du XVI<sup>e</sup> siècle.  
© photo Sonia Ovarlez

De quelle manière le bleu maya participe-t-il à l'élaboration du langage plastique préhispanique ? La recherche d'un pigment de qualité est-il en rapport avec une valeur symbolique forte ? Comment était fabriqué le bleu maya ? Y avait-il plusieurs types de recettes ? Comment les artistes mayas ont-ils réussi à obtenir tant de nuances différentes du bleu maya ? Comment évolue la palette du peintre au fil des époques ou dans des régions différentes ?

En fait dans ces six questions se trouve résumées cinq années de recherches, de doutes, d'interrogations, de joies et de partages.

J'ai découvert pour la première fois le bleu maya en 1999, grâce à Michel Garcia , artisan de la couleur végétale, qui se consacre à la promotion des plantes tinctoriales dans le monde contemporain. Après avoir longuement discuté des intérêts que présente le bleu maya par rapport aux laques végétales, il m'a proposé de travailler sur des reconstitutions du pigment en fournissant les matériaux nécessaires à cette fabrication. C'est au sein du Laboratoire de Chimie appliquée à l'Art et à l'Archéologie de l'Université d'Avignon grâce au Professeur Catherine Vieillescazes, que j'ai réalisé jusqu'à ce jour, toutes les études sur ce pigment. Le bleu maya créé par les artistes précolombiens il y a deux mille ans et encore utilisé de l'époque coloniale au XX<sup>e</sup> siècle, n'avait pas fini d'éveiller ma curiosité, et j'étais loin de soupçonner qu'il allait m'emmener vers de riches aventures.

La présentation de nos travaux lors de colloques nous a permis de tisser des liens avec de nouveaux partenaires comme l'Oréal, et de poursuivre nos travaux en élargissant notre champ d'étude. L'autre rencontre importante fut celle de Bernard Guineau , chercheur au CNRS, spécialiste des colorants et pigments anciens, qui en 2000 m'a confié ses rapports d'analyses sur le bleu maya. Il m'a présenté à François Delamare, Directeur de Recherche à l'Ecole des Mines de Paris, qui a accepté de suivre mon travail. Il a mis à ma disposition les appareillages scientifiques et les techniques d'analyses (MEB/EDX, TOF-SIMS, colorimètre) nécessaires à la poursuite de mon étude.

Mais il me fallait comprendre un art aux sensibilités différentes, et modeler mon regard aux exigences esthétiques et symboliques d'une autre culture. Consciente du fait que cette étude n'aurait pas lieu sans la rencontre avec les œuvres in situ et les spécialistes de l'aire maya, je suis donc partie au Mexique avec une bourse des Ministères des Affaires Etrangères Français et Mexicain. Accueillie pour un séjour de quatre mois au sein du Laboratoire de Diagnostic des Œuvres d'Art de l'Institut de Recherche Esthétique de l'Université Nationale Autonome de México que dirige Tatiana Falcon Alvarez, j'ai pu enrichir mes connaissances historiques, élargir mon étude avec la colorimétrie et partager ma passion.



Fig. 3 : Codex *Azoyu I*

Recto

Epoque coloniale.

Peau de veau

Réserve des codex

Biblioteca Nacional de Antropología e Historia, México D.F.

© photo Tatiana Falcon Alvarez, Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM

Très motivée par le projet, Tatiana Falcon m'a offert de nombreuses opportunités, comme l'accès à certaines œuvres jamais étudiées, afin de mener à bien cette étude. Ce travail de collaboration avec des spécialistes de l'aire maya : Diana Magaloni Kerpel, Leticia Staines Cicero, ou des scientifiques : José Luis Ruvalcaba fut extrêmement porteur et de nouvelles collaborations sont prévues.

Mais voyons maintenant le contenu de cette étude : La première partie présente le bleu maya et son contexte en définissant le langage esthétique maya, les matériaux utilisés dans l'art pictural et les recettes de fabrication des bleus mayas. L'étude bibliographique et historique permet de définir le cheminement des scientifiques qui ont découvert la nature du bleu maya, et les procédés de fabrication de matériaux colorés bleus après la conquête espagnole. Nous proposons des hypothèses concernant la rencontre des argiles et de l'indigo. La compréhension du rôle du peintre et de la conception du monde dans la société maya, nous amène à considérer les questions d'ordre symbolique, et notamment celles liées aux couleurs. Puis nous nous intéressons aux matériaux et aux méthodes de fabrication des bleus mayas, en essayant de nous rapprocher des recettes « historiques ». La réalisation du nuancier de bleus et son étude colorimétrique permet de définir les différents paramètres qui influent sur l'obtention de la couleur.

La deuxième partie est consacrée à l'étude scientifique des bleus mayas et des techniques picturales. Après avoir présenté le corpus d'échantillons étudiés et les techniques analytiques, nous traitons de l'analyse physico-chimique de ces échantillons par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et microanalyse élémentaire par fluorescence X (EDX). Ces analyses, ainsi qu'une première approche par microscopie optique permet de mettre en place une base de données scientifiques afférente aux bleus mayas et aux techniques picturales préhispaniques.

Enfin la troisième partie est consacrée à l'étude colorimétrique des bleu-vert mayas de vingt-deux peintures murales de l'aire maya appartenants à des époques et des régions différentes (les résultats obtenus sur les codex et les céramiques ne seront pas présentés ici). Ce travail réalisé au Mexique de février à mai 2003 permet de définir l'évolution de la palette bleu-vert des mayas. Nous abordons la question des codes de la couleur et grâce à la comparaison des données colorimétriques avec celles du nuancier nous présentons des hypothèses sur les recettes utilisées par les artistes mayas.





Fig. 4 : Jaina, Mexique,  
Figurine de noble,  
Céramique,  
Classique récent (600-800 p. C),  
© Dagli-Orti

L'approche concernant le processus de fabrication et les techniques picturales en fonction des époques et des régions est peu explorée de nos jours.

A l'image du travail réalisé par Constantino Reyes Valerio<sup>2</sup>, notre recherche qui allie l'art et la chimie, espère apporter un éclairage sur quelques techniques méconnues de l'utilisation et de la préparation des bleus mayas.

Le bleu maya et les autres pigments végétaux préhispaniques renferment encore bien des secrets à découvrir...

---

<sup>2</sup> REYES VALERIO, C. *De Bonampak al Templo Mayor : el azul maya en Mesoamérica*. éd. Mexico : Siglo XXI, 1993. 158 p.

Teotihuacan, Mexique,  
Palette de peintre polychrome,  
Classique moyen (240-400 a.C),  
© Michel Zabé, Instituto de Investigaciones Estéticas

---

# Contexte, langage esthétique et recettes

## Première partie



Bonampak, Chiapas, Mexique  
Peinture murale, chambre 1,  
Classique,  
©Diana Magaloni, Instituto de Investigaciones Esteticas

## Chapitre 1

---

### Le bleu maya





Fig. 5 : Chichen Itzà, Yucatán  
Temple des guerriers  
Détail du mur de la bataille  
Postclassique ancien : 1000-1250 p. C.  
Reconstitution de Morris, 1931  
© photo archive photothèque IIE, UNAM

# 1

## Le bleu maya en Mésoamérique

### Etude bibliographique. I – Histoire de la caractérisation du bleu maya.

L'histoire du « bleu maya » commence en 1931, quand H. E. Merwin analysa une substance bleue prélevée lors des fouilles du Temple des Guerriers " *Templo de los Guerreros* " à Chichén Itzá (Yucatán)<sup>1</sup>. Il n'identifia qu'une argile. Mais pourquoi est-elle bleue ? Il orienta ses recherches sur les argiles naturellement bleues. Ce qui ne donna rien de convaincant.

En 1942, J. Gettens<sup>2</sup>, croyant que ce pigment n'existait que dans la zone maya du Yucatán, lui donna le nom de bleu maya. Mais aujourd'hui nous savons bien qu'il existe dans diverses parties de la Mésoamérique, comme El Tajin, Tamuin, Cacaxtla, Tenochtitlan (Templo Mayor de México), Zaachila, Tula et bien d'autres zones d'Amérique centrale.

En 1946 furent découvertes les peintures murales de Bonampak (Chiapas). L'analyse en 1957 par diffraction de rayons X des prélèvements effectués permirent d'affirmer que le bleu maya était composé d'une argile de la famille des palygorskites : *l'attapulgite*. Toutefois, cette argile est blanche et n'explique pas la teinte bleue du pigment.

En 1958, Sheppard suggéra la présence d'un colorant organique responsable de la couleur du bleu maya. En 1962, ses recherches portent d'abord sur le bois de Campêche : *Heamatoxylon campechianum* L ; celui-ci était utilisé à l'époque préhispanique sous le nom de **huitzquauitl** ou **quamotciti**. Il forme des laques bleues avec l'aluminium, l'un des composants de l'argile. Mais les essais de fabrication ne furent pas convaincants, la couleur du pigment obtenu ne soutint pas la comparaison avec celle du bleu maya.

En 1962, Gettens met en évidence sur un échantillon archéologique la présence d'une autre argile : *la sépiolite* appartenant à la famille des palygorskites.

---

<sup>1</sup> MERWIN, Edward, CHARLOT, J., and MORRIS, A. Chemical Analysis of Pigments : The Temple of Warriors at Chichén Itzá, Yucatan, *Carnegie Institution of Washinton publication*, Washington, D.C, 1931, Publication 406.

<sup>2</sup> GETTENS, Rutherford. An Unsolved Problem in Ancient Pigments. *American Antiquity*, 1962, V, 7, num. 4.





Fig. 6 : Cacaxtla  
Edifice A  
Détail du portique sud  
Classique récent : 600–900 p. C.  
© photo archive photothèque IIE, UNAM

En 1966, van Olphen réussit à préparer un pigment similaire au bleu maya en mélangeant et en chauffant de l'attapulгите avec un précurseur de l'indigo : l'acétate d'indoxyle en solution alcaline. Remarquant la stabilité du bleu maya à une attaque par l'acide nitrique à chaud. Il fit un critère d'identification des échantillons résultant d'une fabrication artificielle. Il répéta la même expérience avec d'autres types d'argiles comme la kaolinite, la nontronite et la mordénite, mais le test de résistance à l'acide nitrique bouillant s'avéra uniquement positif pour l'attapulгите. On considéra dès lors que l'argile constitutive du bleu maya devait être une palygorskite.

En 1967, R. Kleber, L. Massechelein-Kleiner<sup>3</sup> et J. Thissen, chercheurs de l'Institut Royal du Patrimoine Artistique à Bruxelles, utilisant la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier aboutissent à la conclusion suivante : " l'indigo est réellement le composé organique qui donne sa couleur au bleu maya ". Ils réalisent également des reconstitutions du pigment avec la forme réduite de l'indigo (indoxyle) et l'attapulгите. Ils obtiennent des propriétés (résistance et couleur) similaires à celles du bleu maya. Plusieurs arguments historiques plaident également en faveur de l'indigo. Il est connu que les civilisations précortésiennes utilisaient ce colorant notamment pour se bleuir le visage et le corps<sup>4</sup>. Ils notent la présence d'eau zéolitique à l'intérieur des canaux de l'argile et proposent qu'à 150°C l'indigo prend la place de l'eau formant ainsi le bleu maya. D'où l'importance de la température de cuisson pour obtenir un pigment stable. Ce sont les premières hypothèses sur le mécanisme de fixation du colorant.

En 1976, A. De Yta<sup>5</sup> étudia des échantillons archéologiques par analyse thermique différentielle. Il identifie ainsi deux argiles support : l'attapulгите et la nontronite (famille des montmorillonites).

En 1982, A. R. Littmann<sup>6</sup> fut le premier à utiliser les feuilles d'indigotier pour ses reconstitutions du pigment avec l'attapulгите. Il obtient un sédiment couleur café qui vire au bleu avec de l'acide chlorhydrique dilué. Il émet l'hypothèse que les indigènes pouvaient employer des réducteurs naturels contenus dans le miel, les fruits ou la canne à sucre pour la préparation du bleu maya.

---

<sup>3</sup>R. KLEBER., L.MASSECHELEIN-KLEINER., J.THISSEN. Etude et identification du bleu maya, *Studies in Conservation*, 1967, vol 12, p. 41-56.

<sup>4</sup> MARGIVAL, F. Couleurs et Peintures au Temps des Civilisations Mexicaines Précortésiennes. *Peintures, Pigments, Vernis*. 1955, 31, p. 1078-1086.

<sup>5</sup> DE YTA, A. *Estudios termicos del azul maya*. Thèse 3<sup>o</sup> c. : Sciences de la matière : Ecole Supérieure de Physique et Mathématiques, IPN, México : 1977.

<sup>6</sup> LITTMANN, E. R. Maya blue-further perspectives and the possible use of indigo as the colorant, *American Antiquity*. 1982, vol. 47, num. 2.

En 1988, Luis Torres<sup>7</sup> rapporte avoir produit le bleu maya avec de l'attapulгите du " sacalum " ou " sak'lu'um " (terre blanche mélange d'attapulгите, sépiolite, et une kaolinite :l'halloisite ) et de l'indigo synthétique. Les pigments obtenus passent le test de résistance à l'acide nitrique avec succès.

En 1993, C. Reyes Valerio<sup>8</sup> par sa double compétence d'historien et de chimiste, conjugua dans son livre valeurs esthétique et scientifique pour donner une définition sensible et pertinente du bleu maya, et pour la première fois proche de la mentalité et du contexte des peuples qui le produisirent. Son livre présente la première synthèse des connaissances autour du bleu maya.

En 1994, M. J. Yacaman et M. C. Serra Puche<sup>9</sup> étudient par microscopie électronique haute résolution HREM plusieurs statuettes de l'île de Jaina, Campêche. L'argile principalement identifiée est ici encore l'attapulгите. Ils présentent des images haute résolution des bleus mayas artificiels et archéologiques.

Depuis 1996, Diana Magaloni<sup>10</sup> se consacre à l'étude des techniques picturales mayas. Avec cette approche novatrice à la fois historique et technique, c'est la première fois que les différentes nuances du bleu maya sont étudiées. Désormais on parlera *des* bleus mayas. Ses articles font prendre conscience de l'évolution de la palette du peintre et des différentes traditions picturales.

A partir de 2001, paraissent une série de travaux de modélisation numérique utilisant des techniques de calcul fondées sur la mécanique quantique et la dynamique moléculaire. Ils montrent la parfaite adéquation de la molécule d'indigotine aux sites existant dans les canaux de l'attapulгите (Chiari<sup>11</sup>, 2001 ; Polette<sup>12</sup>, 2001 ; Fois<sup>13</sup>, 2003). L'indigotine y remplace les molécules d'eau zéolitiques. Fois montre qu'elle remplace préférentiellement l'eau de constitution. Les auteurs s'accordent pour voir en ce processus (dans lequel les deux phénomènes volumique d'*absorption* et surfacique d'*adsorption* se confondent), l'origine de l'inertie chimique du bleu maya.

---

<sup>7</sup> TORRES, L. Maya blue : how the mayans could have made the pigment . *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 1988, num. 123, , p. 123-128.

<sup>8</sup> REYES VALERIO, C. *De Bonampak al Templo Mayor : el azul maya en Mesoamérica*. éd. Mexico : Siglo XXI, 1993. 158 p.

<sup>9</sup> YACAMAN, M. J. et al. Hight Resolution Electron Microscopy of maya blue paint. *Materials Issues in Art and Archaeology IV*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Cancun, Mexique, 1994, vol. 352.

<sup>10</sup> *La pintura mural prehispánica en Mexico : El arte en el hacer, tecnica pictorica y color en la pinturas de Bonampak* / MAGALONI, D et al. Mexico : éd. Instituto de Investigaciones Esteticas, UNAM : II, 2001, pp 50-80.

<sup>11</sup> CHIARI, G., GIUSTETTO, R., DRUZIK, J., SCHILLING, M., REYES VALERIO, C. Maya blue structure : some news insides ", *20th Annual Meeting of Dyes in History and Archeology Proceeding*, Amsterdam, 2001.

<sup>12</sup> POLETTE, L., MEITZNER, G., YACAMAN, M. J., CHIANELLI, R. Maya blue : application of XAS and HRTEM to materials science in art and archaeology. *Microchemical Journal*, 2002, num. 71, , pp 167-174.

<sup>13</sup> FOIS, E., GAMBA, A., TILOCCA, A. On the unusual stability of Maya blue paint : molecular dynamics simulations. *Microporous and Mesoporous materials, Elsevier Science*, 2003, n°57, pp 263-272.

A la suite de ces travaux, deux questions se posent :

- on aimerait savoir si l'*indirubine*, qui est plus abondante que l'*indigotine* dans l'*indigofera suffruticosa* Miller mexicaine utilisée par les mayas, peut également s'introduire dans les canaux de l'attapulgite ;
- comment se fait-il que la couleur de ce pigment provienne non d'une coloration de la surface de l'argile, mais d'une diffusion à l'intérieur ?

Nous pouvons résumer par un tableau ces différentes données :

Echantillons archéologiques			Echantillons synthétiques		
Date	Nom	Résultat	Date	Nom	Résultat
1931	Merwin	Découverte bleu maya	1962	Sheppard	bois de campêche + attapulgite : pas convaincant
1957	Sheppard	RDX : attapulgite	1966	van Olphen	acétate d'indoxyle + attapulgite : convaincant
1962	Gettens	RDX : sépiolite		Massechelein	acétate d'indoxyle + Kaolinite ou nontronite ou mordénite : pas convaincant
1967	Massechelein	DRX, FTIR : attapulgite indigo	1967		attapulgite + leuco-dérivé de l'indigo : convaincant
1976	De Yta	Analyse thermique différentielle : attapulgite, nontronite		Littmann	DRX, FTIR :
			1982	Torrés	
	Reyes Valerio	FTIR : attapulgite, indigo	1988	Reyes Valerio	Feuilles indigotier + attapulgite
1993	Yacaman	XAS, HREM : attapulgite	1993	Yacaman	Sacalum (argiles) + indigo synthétique : convaincant
1994	Magaloni	MEB, RDX : attapulgite, sépiolite, kaolinite, gains malachite et azurite	1994		Feuilles indigotier + attapulgite
1996					Indigotine synthétique + attapulgite
		XAS, HREM : attapulgite, influence du fer de l'argile		Chiari	
2002	Polette, Yacaman		2001		Modélisation indigotine et attapulgite
				Fois	
			2003		Modélisation liaison indigotine- attapulgite par dynamique moléculaire

Tableau II : Etude scientifique du bleu maya et chronologie

Que conclure ? En dépit d'une bibliographie assez importante, et comme le montre le tableau I, nous nous trouvons dans une situation très inhabituelle : aucune caractérisation d'un bleu maya d'origine archéologique n'a pu être menée à terme, c'est-à-dire en isolant le ou les colorants. Seules jusqu'à maintenant, les argiles qui lui servent de support ont pu être identifiées. Et ce n'est qu'à partir de multiples expériences de reconstitution menées en laboratoire avec l'indigotine que, progressivement, s'est élaborée une hypothèse crédible sur la composition du bleu maya.

Trois critiques majeures peuvent être faites à cette démarche :

- Les reconstitutions effectuées en laboratoire emploient presque toutes des produits purs, attapulгите et indigotine, ce qui est probablement assez éloigné des recettes traditionnelles.
- Depuis van Olphen, on a utilisé comme un critère caractérisant le bleu maya sa résistance à l'attaque par l'acide nitrique bouillant. Il faut prendre garde qu'un tel critère exclut les bleus mayas réalisés avec des argiles autres que les palygorskites, comme les montmorillonites et les kaolinites, qui ont été utilisées ainsi que nous le verront plus loin.
- On a toujours attribué au bleu maya une teinte unique, « bleu turquoise ». La réalité est bien plus variée, et offre une véritable palette de teintes, comme nous le verrons au chapitre 2.

Il est temps de passer à la seconde partie de cette étude bibliographique, plus historique, consacrée à la manière dont les indigènes préparaient les couleurs



de las partes otras, y assi viene a bazerim infinitum como se podra ver en el siguiente exemplo. *La*, quiere decir *laco* y caeac con el, para escribirle con sus caracteres aniendo los nosotros *See So* entender que son dos letras lo escribiã ellos con tres pñmiendo a la aspiracion de la *ph*, la vocal *e*, que antes de si trae, y en esto no fazierran aning osens e si quisieren ellos de su curiosidad. Exemplo.

despues al cabo le pegau la parte junta. *Ha*, que quiere decir agna porq la *ba* tiene a *h*. ante de si lo ponen ellos al principio con *a*. y al cabo desta manera

Tambie lo escriben a partes <sup>para</sup> de la *nia* y otra *ma*

no pusiera aqui ni *trata* dello sino pa dar cuenta entera de las cosas desta gente. *Mamhah* quiere decir no quiero, ellos lo escriben a partes desta manera.

Sigue'se su a, b, c.


De las letras que aqui faltan carece esta lengua y tiene otras añadidas de la *maestra* para otras cosas q las ha menester, y ya no estan para nada de sus caracteres especialmente la *gente moça* q au aprendido los *uicos*

Fig. 7 : Première tentative de transcription de hiéroglyphes mayas  
 Détail d'une page du manuscrit du missionnaire Diego de Landa « *Relacion de las Cosas de Yucatán* » datant de 1560 et recopié en 1661.  
 Collection de l'Académie royale d'histoire de Madrid

# 2

## Préparation des couleurs par les indigènes. Etude bibliographique. II – Les bleus dans les textes du XVI<sup>e</sup> siècle.

Bien que l'emploi de ce pigment bleu-vert semble débiter dès le VII<sup>e</sup> siècle, les documents dont nous disposons ne datent que du XVI<sup>e</sup> siècle. De plus, ils n'émanent pas directement des artistes ou des préparateurs mayas, mais des moines évangélistes, curieux de tout observer et de rapporter de cette civilisation.

Ces documents qui traitent de la pratique picturale ne sont pas nombreux : on en dénombre quatre. Les trois premiers sont connus depuis longtemps et cités par de nombreux auteurs. Il s'agit de trois auteurs contemporains, mais résidant dans des zones différentes :

- Bernardino de Sahagun, *Historia de las cosas de la Nueva España (Histoire des choses de la Nouvelle Espagne)*. 1981, Mexico, Editorial Porrúa). Cette encyclopédie en trois volumes composée de douze livres est également connue sous le nom de Codex<sup>1</sup> Florentino et fut écrite à Tlatelolco entre 1575 et 1580. Le chapitre 11, paragraphe 10 traite de la manière dont on obtenait la couleur bleue. Sahagun s'intéresse aux coutumes et la manière de penser des indiens des régions centrales de l'Altiplano<sup>2</sup>. Il retranscrit des recettes anciennes de teintures et de fabrication de pigments. Ces pratiques pouvaient être également celles des mayas.
- Francisco Hernandez, *Obras completas III. Historia natural de la Nueva España (Œuvres complètes III. Histoire naturelle de la Nouvelle Espagne)*. 1959. México : Universidad Nacional Autónoma de México.). Le manuscrit date des années 1571-1576.
- Diego de Landa, *Relacion de las cosas de Yucatán (Relation des choses du Yucatán)*. 1994. México : Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.). Landa observe, lui, dans le Yucatán.

---

<sup>1</sup> Manuscrit pictographique sur papier d'écorce ou sur peau de cerf ou veau.

<sup>2</sup> Altiplano : centre du Mexique, c'est-à-dire la ville de México, les états de Mexico, Morelos, Puebla, et Querétaro.



NOM EN MAYA	NOM COMMUN	NOM SCIENTIFIQUE	SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES <sup>3</sup>	UTILISATIONS
Abal k'ilm- Kin Caan	Ciruelo de esta tierra (prunier de cette terre) Ciruelo amarillo y rojo (prunier jaune et rouge)	Spondia spp., Finca prusia, Tapiriria mexicana	Cordemex, Relaciones Geograficas, Roys, Hernandez	C'est une gomme qui cristallise (its)
Chakah- Its-chakah	Palo jiote, mulato, palo retinto (bois jiote, mulato, retinto)	Bursera simaruba	Cordemex, Littmann, Landa, Thompson, Relaciones Geograficas, Roys	L'écorce se mélange avec la chaux. Bois de chauffage
Holol	Corcho rojo (Chiapas), jonote (Veracruz), jonote de verano (Guatemala)	Belotia capbelli y mexicana Helicarpus tomentosus Helicarpus spp.	Cordemex, Martinez Falcon, Magaloni Lombardo	Ecorce glutineuse qui se mélange avec la chaux au Yucatán Utilisation de la gomme à Veracruz Utilisation de la gomme pour peindre au Petén
Kulche- K'in chan	Cedro rojo, cedro de esta tierra (cèdre rouge, cèdre de cette terre)	Cedrela spp. y Guerea spp.	Lombardo, Cordemex, Relaciones Geograficas, Roys, Landa	Gomme qui cristallise (its) utilisée pour peindre au Petén
Ha'bin	Madero de hierro, jabin (bois de fer)	Pescidia communis	Littmann, Thompson, Cordemex, Relaciones Geograficas	La gomme se mélange avec la chaux. Le bois est utilisé pour la construction
Kopo'	Alamo (Chiapas)	Ficus Nitida	Cordemex, Relaciones Geograficas, Roys, Falcon, Magaloni	Le bois s'utilise pour fabriquer du papier. La gomme et l'écorce sont connues au Chiapas
Kab	Miel y cera de abeja (Miel et cire d'abeille)		Doc anonyme de 1548, Roys, Steggerda, Relaciones Geograficas, Roys, Landa	En mélange avec des gommes pour fabriquer des peintures
Tzàcuhtli Kuk (bulbe et gomme liquide)	Orquidea Flor de concha, pulpito Flor de candelaria Flor de mayo (orquidée, fleur de coquillage, pulpito, fleur chandelle, fleur de mai)	Bletia purpurea y campanulata Encyclia Cochleata Encyclia adenocaula Barkevia Lindleyana Encyclia nematocaulon	Sahagun, Hernandez, Codex Badianus, Landa, Doc anonyme de 1548, Martinez-Cortés, Martinez y Cordemex	Dans l'Altiplano, était préparée une colle en poudre pour le travail des plumes ou des peintures
Chucum	Huachimil (Mexico) Huizache (Campêche)	Pithecolobium albicans	Littmann, Thompson, Roys	Utilisé pour peindre, la gomme est mélangée à la chaux dans le Yucatán
Chacte		Ceasalpina platyloba Ceasalpina violacea	Thompson, Roys	Produit une gomme et un colorant rouge. Utilisé comme crayon de couleur

Tableau III : Matériaux de la forêt tropicale et liants de peinture d'après D. Magaloni

<sup>3</sup> Voir bibliographie en fin d'ouvrage

A ces trois ouvrages, je dois à Diana Magaloni, de l'UNAM, la connaissance d'un quatrième document, essentiel et jusqu'ici non répertorié, conservé aux archives du Fondos Virreinales del Archivo del Centro de Estudios de Historia de México, Condumex.

- Anonyme, *Del modo como hacian sus pinturas los indigenas de la zona maya y otras noticias*, Manuscrit inédit 1548, (*De la manière dont les indigènes de la zone maya préparaient leur peinture et autres nouvelles*).

A première vue, aucun de ces textes ne parle explicitement de bleu maya. Ils traitent de teinture en bleu à base de différentes plantes (dont l'indigotier), de la préparation de ce qui pourrait être des pains d'indigo, et de la préparation des peintures. L'étude attentive de ces textes semble pourtant pouvoir fournir des indications sur ce qui pourrait être une préparation de bleu maya.

Voyons d'abord la préparation de la peinture, liants et pigments

## Les liants

Pour fixer la couleur sur le support (mur, céramique ou codex), le peintre utilise un liant. Le principal liant cité par Sahagun et Hernandez est une gomme végétale, le « *tzacutli* » (*Bletia campanulata*) en Nahuatl<sup>4</sup>, extrait de racines d'orchidées. Les peintures étaient préparées en mélangeant le pigment à la gomme, vendue sur les marchés sous forme de poudre pour les peintres. Il y avait des spécialistes des gommes et résines, capables d'identifier dans la jungle les exsudats des arbres utilisés pour peindre. Les bulbes étaient coupés puis laissés sécher au soleil et finalement broyés jusqu'à obtenir une poudre. D'après l'anonyme, cette poudre appelée « *kuk* » dans l'aire maya était ensuite mélangée avec du miel et de la cire d'abeille. Les artistes utilisaient également l'exsudat de « *l'holol* » (*Belotia capbelli et mexicana* ou *Heliocarpus spp.*) ou de l'arbre « *chakah* » (*Bursera sinaruba*) ou encore le blanc d'œuf de faisan sauvage pour préparer la couleur bleue d'après l'étude d'Edward Thompson<sup>5</sup>.

Les dessins préparatoires étaient réalisés à l'aide de crayons constitués avec des morceaux de bois teints en rouge par le colorant de ce même arbre ou brûlés pour donner un noir : « *chacte* » (*Ceasalpinia platyloba*). Ci-contre nous présentons le tableau récapitulatif des possibles liants de la peinture maya.

---

<sup>4</sup> Langue maya de l'Altiplano. C'est une langue appartenant au groupe uto-aztèque et parlée notamment par les aztèques. Au XVI<sup>e</sup> siècle le Nahuatl est la langue universelle de la Mésoamérique.

<sup>5</sup> THOMPSON, E. *People of the Serpent Life and Adventure Among the Mayas*. New-York: The Riverside Press Cambridge, 1932.

Bien que chacun des matériaux suivants puisse être obtenu sous forme de poudre, leur classification ne se fait vraiment que lors de leur emploi dans un milieu, liant ou solvant.

**Colorant** : composé coloré *soluble* dans le milieu d'emploi. Exemple 1 : composés organiques dissous dans l'eau et servant à la teinture (alizarine, ...). Exemple 2 : oxyde de cobalt dissous dans un verre et lui communiquant une teinte bleue (smalt).

Le milieu d'emploi avec son colorant constitue une phase unique. Il n'est pas possible d'observer (par exemple, par microscopies électroniques) les molécules du colorant.

**Pigment** : poudre colorée *insoluble* dans le milieu d'emploi. Exemple 1 : ocre jaune dispersée dans un liant à l'œuf (tempera). Exemple 2 : oxyde de cobalt dispersé dans un liant à l'huile (bleu de cobalt).

Le *pouvoir colorant* du pigment se définit comme sa capacité à communiquer une teinte à une quantité donnée de peinture blanche. Ainsi, le bleu de Prusse a un pouvoir couvrant beaucoup plus élevé que celui de l'azurite.

L'ensemble milieu d'emploi (liant) / pigment constitue un milieu biphasé. On peut donc observer les pigments avec les moyens appropriés. L'interface pigment / liant joue un rôle capital pour les propriétés optiques et rhéologiques de la peinture : c'est de lui que dépend son *pouvoir couvrant* (opacifiant), d'autant plus élevé que la différence des indices de réfraction du liant et du pigment est grande. Exemple : différence d'indices faibles : couleurs pour aquarelle ; différence d'indices forte : couleurs pour gouache.

La *dispersion* du pigment dans un liant est sous la dépendance des propriétés physico-chimiques de l'interface liant / pigment. Son amélioration peut être obtenue par ajout d'un tensio-actif (lécithine du jaune d'œuf, fiel de bœuf...).

**Charge** : poudre non colorée insoluble dans le milieu d'emploi, et qui a une différence d'indice de réfraction faible ( $\Delta n < 0,25$ ) avec le milieu d'emploi. Exemple : la calcite [ $\text{CaCO}_3$ ] (indice de réfraction  $n = 1,57$ ) est un pigment blanc très couvrant lorsque le milieu ambiant est l'air (peinture au lait de chaux :  $\Delta n = 1,57 - 1,00 = 0,57$ ). Dispersé dans un liant polymère de peinture moderne, il est transparent :  $\Delta n = 1,57 - 1,50 = 0,07$ ). C'est alors une charge.

**Laque** : mot à sens multiples. En ce qui nous concerne : la palette de teintes réalisable avec des pigments minéraux étant assez restreinte, on a très tôt appris à teindre des poudres non colorées (alumine, calcite, plâtre, argiles blanches) avec des colorants. Les poudres colorées obtenues, des pigments, sont appelées *laques*. Grecs et romains utilisaient des laques de garance et d'indigo.

Tableau IV : Définitions des matériaux de la couleur

Notons simplement que les gommes et résines étaient classifiées par les mayas selon leur système taxinomique :

1. *Holol* signifiait un exsudat collant et onctueux comme le lait.
2. Le préfixe *its* signalait la nature semi-cristalline de l'exsudat.
3. *Sats* renvoyait aux exsudats en forme de larmes blanchâtres qui en séchant devenaient élastiques.
4. *Kuk* se référait aux exsudats liquides et collants des pseudo-bulbes.

Le processus de préparation des liants était hautement symbolique comme nous le verrons pour la chaux ou le bleu maya.

## Les pigments

Les couleurs étaient issues à la fois du règne minéral, végétal et animal. En ce qui concerne la palette minérale, les analyses montrent que les artistes employaient les ocres jaunes et rouges, le cinabre, des terres vertes (sans plus de précision), du charbon, et pour les blancs, de la calcite ou des argiles blanches (attapulgitite). L'emploi d'azurite et de malachite est beaucoup plus rare. On peut noter que les mines d'où provenaient ces minéraux étaient situées loin dans le nord du Mexique, hors de l'aire maya. En effet, la péninsule du Yucatán est formée géologiquement par une couche de roches calcaires et dolomitiques. Les minéraux pouvant fournir des pigments non blancs étaient donc rares, chers et difficiles à se procurer compte tenu de la distance.

C'est probablement la raison pour laquelle la palette maya contient tant de pigments (environ 50%) dont la couleur provient du règne végétal. C'est ce qui fait sa réelle originalité. Ainsi à côté des bleus mayas, existent aussi des rouges, des verts et des jaunes qui semblent fabriqués de la même manière, par teinture d'une palygorskite suivie de sa cuisson. Ces pigments constituent donc une famille homogène, qui n'entre pas dans la classification usuelle rappelée dans le tableau II. C'est une des originalités de la civilisation maya.

Notre travail d'expérimentation nous a montré que la fabrication des bleus mayas était très délicate, certainement plus sophistiquée que celle des pigments extraits de minéraux. On peut donc penser avec Magaloni<sup>6</sup> que cette fabrication était le fait d'ouvriers très spécialisés.

---

<sup>6</sup> *La pintura mural prehispánica en México : Materiales y técnicas de la pintura mural maya* / MAGALONI, D et al. México : éd. Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM : II, 2001, pp 50-80.



Fig. 8 : Fleur de *Commelina coelestis* ou matlalli (haut) ; représentation du matlalli dans le codex Badianus (centre) ; traitement pour les yeux à base de matlalli décrit dans le codex Florentino (bas).

## Les pigments bleus

Hernandez rapporte que les couleurs bleues utilisées par les peintres préhispaniques étaient issues du règne végétal. Il ajoute qu'elles étaient commercialisées sous forme de «pains».

Sahagun parle de trois types de bleus vendus en «pains» mais ne commente pas les procédés de fabrication :

- « pour la couleur bleue appelée *matlalli*, qui veut dire bleue, prenez des fleurs bleues. ... »

Le *matlalli*, « fleur céleste » ou « herbe de poule »<sup>7</sup> est une fleur bleue diurne et sauvage qui appartient à la famille des Commelinaceae. Les pétales de *Commelina coelestis* Willd. s'utilisaient aussi frais ou secs également pour leurs propriétés médicinales.

Dans le Codex Florentino et Badianus<sup>8</sup>, elles étaient recommandées pour les irritations oculaires. Le colorant issu de ces fleurs sert de papier pH.

« il existe une herbe des terres chaudes que l'on appelle *xiuhquilitl*, la broyer et en extraire le jus et le laisser sécher. Il est possible de teindre en une belle couleur bleu foncé... »

Le *xiuhquilitl* correspond au « bleu d'añil » ou à « l'añil », nom espagnol de l'indigo. Il est également mentionné dans le Codex Florentino. Ici Sahagun semble se référer soit à la « florée d'indigo », soit aux « blocs » d'indigo solides. Malheureusement il oublie de mentionner les étapes importantes du procédé d'obtention de la couleur. Emmart<sup>9</sup> rapporte que le *xiuhquilitl* était utilisé comme cosmétique par les Aztèques.

Hernandez, lui, décrit que :

« les indigènes préparaient une couleur bleue au moyen des feuilles d'une plante appelée «*xiuhquilitzahua*» ( c'est-à-dire la plante qui donne l'añil).

<sup>7</sup> CASTELLO YTURBIDE, T. Las huellas de una flor. *Arqueologia mexicana*, 1996, vol.3, num. 18, p. 64-67.

<sup>8</sup> *Codex Badianus* ou *Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis*, manuscrit bilingue (Nahuatl – espagnol) du XVI<sup>e</sup> siècle produit par deux scribes aztèques en 1552 au Collège de Santa Cruz à Tlatelolco et traitant des plantes médicinales mexicaines. Traduit en 1940 en Anglais par Emmard.

EMMART, E. W. 1940. *The Badianus Manuscript (Codex Barberini, Latin 241) Vatican library: an Aztec Herbal of 1552*. Baltimore: John Hopkins Press.

<sup>9</sup> EMMART, E. W. 1961. Notes on Aztec Dye Plants: Indians of Prehistoric Mexico Skilled in Use of Natural Colorings. *Plants and Gardens*, vol. 20, no. 3: 83-85.



Fig. 9 : Saint Antoine de Padoue  
Anonyme  
Sculpture en bois polychrome  
XVII-XVIII<sup>e</sup> siècle  
Campêche, Collection particulière, Maria del Rocio Jimenez Diaz  
© photo Sandra Zetina , INAH, Mexique

Il donne des précisions intéressantes :

« les indiens mélangeaient les feuilles et l'eau bouillante dans un récipient, le tout est agité fortement (*oxygénation du bain*). Puis ils transvasaient l'eau jaunâtre (contenant le colorant sous sa forme incolore ou précurseur) dans un autre récipient laissant le liquide s'écouler par le trou du récipient spécifique à cet usage (*il semble qu'il s'agit encore de l'étape d'oxygénation*). Ils attendaient ensuite que se dépose le sédiment (*l'indigotine et indirubine précipitées*). Ce sédiment est le colorant qui était séché au soleil et modelé en grosses boules ou pain. Puis elles étaient mises à durcir en les posant sur des braises, elles se gardaient durant une année».

Apparemment nous avons ici la description de la fabrication des pains d'indigo telle qu'elle se faisait également en Occident (voir la description en chapitre 2.2). Cependant l'utilisation de braises pour durcir les pains peut paraître étrange car un nouveau séchage au soleil devrait être suffisant. Ce durcissement sur braise ne serait-il pas plutôt une cuisson d'un bleu contenant une argile (on sait qu'une des propriétés des argiles est de durcir à la chaleur) ?

Ne serions-nous pas en présence d'une méthode de fabrication du bleu maya ? Il est vrai qu'Hernandez ne parle pas d'argile mais compte tenu du fait que la préoccupation de ces moines n'était pas de faire des descriptions rigoureuses des recettes et que les traductions du maya en espagnol sont parfois fantaisistes, nous pouvons envisager cette éventualité.

Une autre observation de praticien pourrait nous faire pencher vers la présence d'une argile : nous savons qu'il faut une grande quantité de feuilles pour obtenir un pain d'indigo pur, or ici il semble que la quantité de sédiment récupérée soit assez importante. L'hypothèse qui permettrait d'expliquer ce phénomène serait la présence d'argile, dans le récipient.

En ce qui concerne le troisième bleu chez Sahagun :

- « Il y a une couleur bleu clair de la couleur du ciel appelée *texotli* ou *xoxouic* ou encore *tlaceuilli* ; c'est une couleur très utilisée pour les vêtements, manteaux d'hommes et huipils des femmes».

Ce matériau est à la fois utilisé comme peinture et comme teinture selon Sahagun. Nous ne connaissons pas la substance colorante utilisée ici pour obtenir cette couleur, mais elle semble s'apparenter au *xiuhquilitl* puisqu'elle provient de la macération de feuilles d'une plante. On sait qu'au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle les habits bleu noir des moines furent remplacés par



des habits bleu turquoise<sup>10</sup>. Cette couleur pouvait être utilisée comme pour peindre des tissus ou des sculptures polychromes représentant ces religieux (fig. 9). L'archéologue Ricardo Agurcia a découvert en 1991, à Copan des restes de textiles « peints » avec du bleu maya. Cette ancienne pratique consistait à enduire des vêtements ou des tissus de bleu maya pour les purifiés avant qu'ils soient utilisés dans certains rituels. La sculpture polychrome que nous voyons ici, est peut-être l'exemple d'un syncrétisme entre croyances indigène et iconographie coloniale.

A propos de la même couleur, Hernandez dit :

« c'est comme une espèce de terre [ ] qui se triture, se met en sac en y ajoutant de l'eau [ ], puis filtrée, séchée et modelée en pastilles bleues elle est utilisée par les peintres ».

Il semble bien s'agir ici de bleu maya, bien que sa recette ne soit pas mentionnée. La terre pourrait être une argile, d'autant plus que le nom courant de l'argile blanche au Mexique est «tierra blanca».

Ce qui est sûr c'est que le mot *xiuhquilitl* se rapporte à l'indigo ou au colorant alors que *xiuhquilitzahuac* désigne la plante. *Texotli* correspond à une couleur ou au matériau coloré final, union de la charge et du colorant (indigo), peut-être le bleu maya...



Fig. 10 : Xiuquilitzahuac ou anil  
Aquarelle de Gaëtan de Chatenet  
© Dominique Cardon

<sup>10</sup> Dixit Sandra Zétina d'après *Iconografía aplicada a la escultura polychromada* de Miguel Alvarez Arevalo, 1990, p.16





- Ambre
- Cacao
- Obsidienne
- Serpentine
- Jade
- Quartz
- Miel
- Sel

Fig. 11 : Carte des ressources naturelles de l'aire maya. Issue du National Geographic, supplément décembre 1997.

# 3

## Sur la rencontre des argiles et de l'indigo

L'argile a une importance considérable dans le bleu maya, et nous verrons qu'elle est à l'origine de sa pérennité. Sans elle le bleu maya n'existerait pas, le pigment serait alors une laque d'indigo, comme celle que tous les peuples du monde utilisent depuis plus de trois mille ans. Quel fut donc le chemin des argiles pour arriver jusqu'à l'indigo ?

Les créateurs de ce bleu durent jongler avec un environnement limité en ressources minérales<sup>1</sup> (fig. 10) et leur connaissance des matériaux pour aboutir à la fabrication du pigment. Le bleu maya est peut-être le résultat de la rencontre de la volonté et des circonstances...

### Les argiles

Le territoire maya est principalement calcaire. Au niveau géologique, les argiles se rencontrent dans les couches calcaires. Il était donc facile pour les mayas de récolter des argiles. Il est vrai que souvent le choix des matériaux était dicté par la proximité de ceux-ci. L'argile ou les calcaires étaient donc les matériaux les plus couramment utilisés pour la construction, les enduits et les pigments.

Les palygorskites abondent dans toute la péninsule du Yucatán. Des mines d'attapulгите préhispaniques ont été identifiées par Arnold et Bohor<sup>2</sup> dans le Nord de la péninsule du Yucatán près des villages de Ticul, Mama, Sacalum, Maxcanu, Akil et Uxmal. Le site de Sacalum semble avoir été un des lieux importants d'approvisionnement en argile des Mayas de cette région. D'ailleurs, *Sak' lu'um* signifie dans la langue maya « tierra blanca », ou terre blanche, terme espagnol utilisé au Mexique pour dire argile. L'attapulгите est une argile néoformée sédimentaire que l'on trouve dans des zones aquatiques ou anciennement aquatiques : rivières, grottes, résurgences. L'étude de Sanchez<sup>3</sup> montre que la montmorillonite, essentielle au métabolisme des minéraux, est présente dans de nombreux états du Mexique :

<sup>1</sup> HANSEN, E et al. Los analisis de los estucos y pinturas arquitectonicas de Nahbé : resultados preliminares de los estudios de los metodos y materiales de produccion. *VII Simposio de Incestigaciones arqueologicas en Guatemala*, Guatemala, Museo Nacional de Antropologia y Etnologia, 1994, p. 18-22.

<sup>2</sup> ARNOLD, D. E, et BOHOR, B. F. Attapulгите and Maya blue: an ancient mine comes to light. *Archaeology*, 1975, vol.28, num. 1.

<sup>3</sup> SANCHEZ, P. *Properties and management of soils in tropics*. éd. New York: John Wiley and Sons, 1976. 72p.



Fig. 12 : Carte de l'aire maya – Etats du Mexique actuel

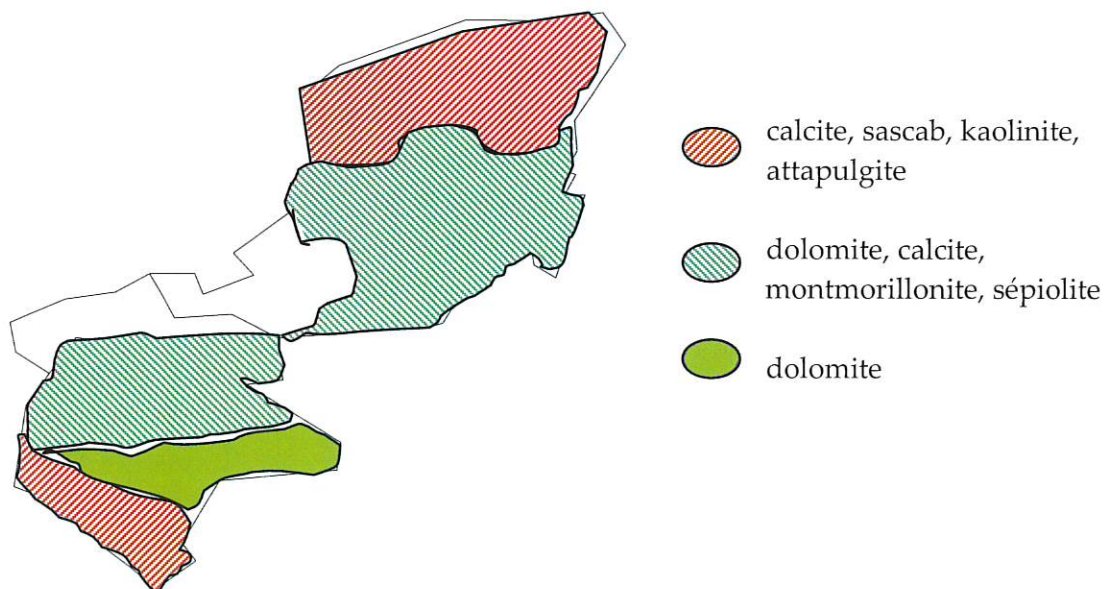


Fig. 13 : Carte géologique de l'aire maya

Michoacan, Guerrero, Puebla, Morelos, Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Chiapas, Yucatán, ainsi qu'en Amérique centrale. Notons que dans la nature, il est très rare de trouver une variété absolument pure, et que l'on rencontre très souvent des mélanges de deux ou plusieurs variétés d'argiles possédant donc en partie les caractéristiques de chacun des constituants. Ces remarques corroborent les résultats d'analyses d'échantillons de bleus mayas où sont présents plusieurs argiles et autres minéraux.

Il se peut que l'utilisation sporadique d'argiles autre que l'attapulгите ou la sépiolite réponde à un choix de proximité, quoique la valeur symbolique de l'argile et du pigment ait été une condition suffisante à l'établissement de réseaux commerciaux. Quoiqu'il en soit les mayas utilisaient d'autres argiles qui possédaient à peu près les propriétés recherchées.

### Les sources d'indigo

L'indigo lui est présent dans toute l'aire maya, il s'agit principalement de l'espèce *indigofera suffruticosa* Miller. appelé «indigo du Mexique» (fig. 13)<sup>4</sup>. A la frontière avec le Guatemala, dans l'état du Chiapas poussent d'autres espèces d'indigotiers, l'*indigofera guatemalensis* et *indigofera secundiflora* qui peuvent être aussi une source possible d'indigo pour les mayas. L'*indigofera anil* L. est en fait l'ancien nom donné à *indigofera suffruticosa* Miller. Aujourd'hui le mot espagnol «*anil*» est associé aussi bien à l'indigo qu'à la plante qui donne l'indigo, c'est-à-dire pour le Mexique : *indigofera suffruticosa* Miller.

Une autre source d'indigo possible serait l'indigotine issue de la pourpre ou *purpura maritima* qui vient du « caracol purpurea pansa ». La pourpre ou dibromo indigotine est un colorant violacé appelée contenu dans la glande hypobronchiale de certaines espèces de coquillages (fig. 14). Dans de nombreux sites archéologiques du Mexique, côte Pacifique et Chiapas, furent retrouvés d'énormes tas de coquilles de murex attestant une activité importante autour de la pourpre à l'époque préhispanique.

L'utilisation de la pourpre est attestée au XVI<sup>e</sup> siècle par Matias Mota Padilla dans la *Narracion de la costa de Jalisco*<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Des textiles archéologiques analysés par Wallert ont permis d'identifier *Indigofera suffruticosa* Miller. WALLERT, A.1997. The analysis of dyestuffs on historical textiles from Mexico. In *The unbroken thread: Conserving textile traditions of Oaxaca*, ed.Kathryn Klein. Los Angeles: J. Paul Getty Trust. 57–85.

<sup>5</sup> TUROK, M. Xihuitl, nocheztli y tixinda. Tintes del Mexico antiguo. *Arqueologia Mexicana*. 1996, Mexico, vol III, n° 17.



Fig. 14 : *Indigofera suffruticosa* Miller. ou indigotier du Mexique  
Conservatoire de plantes tinctoriales, Jardin du château de Lauris, association Couleur Garance.  
©photo Michel Garcia



Fig. 15 : Teinture de laines avec « la pourpre » au Mexique  
© photo Fluvio Eccardi

## La rencontre : le bleu maya serait-il fils de la teinture à l'indigo ?

Une hypothèse a été formulée par Valerio. Nous en proposerons deux autres.

Pour Valerio<sup>6</sup>, l'eau servant à préparer la cuve de teinture à l'indigo aurait pu accidentellement contenir une certaine quantité d'argile.

Après élimination des feuilles par filtrage, et oxygénation du bain pour faire apparaître l'indigo, un sédiment bleu correspondant à l'action du colorant sur l'argile se serait déposé au fond de la cuve. Une laque d'indigo. Les mayas auraient alors utilisé ce phénomène pour la fabrication de leur pigment à plus « grande échelle ». Et surtout, ils auraient mis au point la cuisson de cette laque.

Les lieux où les teinturiers s'approvisionnaient en eau : rivières, *cenotes*<sup>7</sup>, retenues d'eau naturelles, coïncident avec ceux où les argiles sont présentes (fig. 15). Aussi est-il tout à fait envisageable que l'eau utilisée puissent contenir des argiles. L'étude de Sanchez<sup>8</sup> sur l'histoire du *xiuhquilitl* apporte des éléments intéressants pour notre raisonnement. D'abord une lettre de 1558 dans laquelle le roi d'Espagne demande que l'on recueille des informations sur « l'herbe ou la terre » avec laquelle les indiens teignaient la laine et le coton en bleu afin d'arrêter l'importation de pastel (plante à indigo européenne, *Isatis tinctoria*) de France. Ensuite la réponse, un rapport qui décrit le mode de fabrication de l'indigo solide. Il est précisé que l'eau doit provenir d'une rivière (eau courante) et non d'un étang (eau stagnante) : « [ ] *del agua que ha de ser corriente de algun rio o arroyo y no de cienaga...* ». Cette eau pouvait contenir des argiles.

De plus la cueillette des feuilles d'indigo était réalisée à la fin du mois de juillet. La préparation des pains d'indigo ou du bleu maya devait suivre ce calendrier. En effet il n'existe aucune mention, dans les textes historiques ou dans les rapports de fouilles, de boules de feuilles sèches

---

<sup>6</sup> REYES VALERIO, C. op. cit.

<sup>7</sup> Cenote en espagnol vient du maya *ts'onot*. Puits naturel dû à l'effondrement de la couverture calcaire.

<sup>8</sup> SANCHEZ, M. R. *Historia del anil o xiuhquilitl en centro america*. éd El Salvador : Ministerio de Educacion, 1976, 2 vols ; 1. p. 32.





Fig. 16 : *Cenote* ou gouffre de Bolonchen, Yucatán  
Lithographie de Frederick Catherwood  
View of ancient monuments of central America, Chiapas and Yucatán  
1844, Londres  
© Bibliothèque de l'image

analogues aux cocagnes qui permettaient la conservation du colorant. A cette époque de l'année c'est la saison des pluies et les eaux des rivières devaient contenir une grande quantité de matériaux du sol en suspension (comme des argiles), « remués » par ces pluies torrentielles.

La première de nos hypothèses résulte d'une discussion avec Garcia<sup>9</sup>. Elle se rapporte à l'opération de foulage de la laine. Déjà décrite par Pline l'Ancien vers 77 de notre ère, elle consiste à battre les laines après teinture dans une cuve remplie d'eau et d'argile appelée « la terre de foulon ». L'objectif était d'enlever l'excédent de colorant non fixé (qui aurait teint en bleu la peau à son contact) et d'enrober la fibre d'une fine couche d'argile protégeant la couleur. Les laines ainsi traitées ne dégorgeaient plus. L'argile qui avait absorbé l'excédent de colorant, précipitait au fond de la cuve et pouvait être récupérée. Encore une laque d'indigo. L'équivalent méso-américain de la terre à foulon s'appelle « tierra de batàn » car les laines ou tissus étaient battus dans cette eau argileuse. La mention de la « tierra de batàn » dans la littérature historique ne date que de l'époque coloniale, mais rien n'empêche de supposer que cette pratique ait pu être plus ancienne. Les quantités d'argiles utilisées pour le foulage sont importantes, et par conséquent la quantité de sédiment aussi. Nous avons reproduit ce processus. La couleur du sédiment obtenu est très proche de celle du bleu maya, bien qu'il n'y ait pas eu de cuisson : c'est un bleu turquoise.

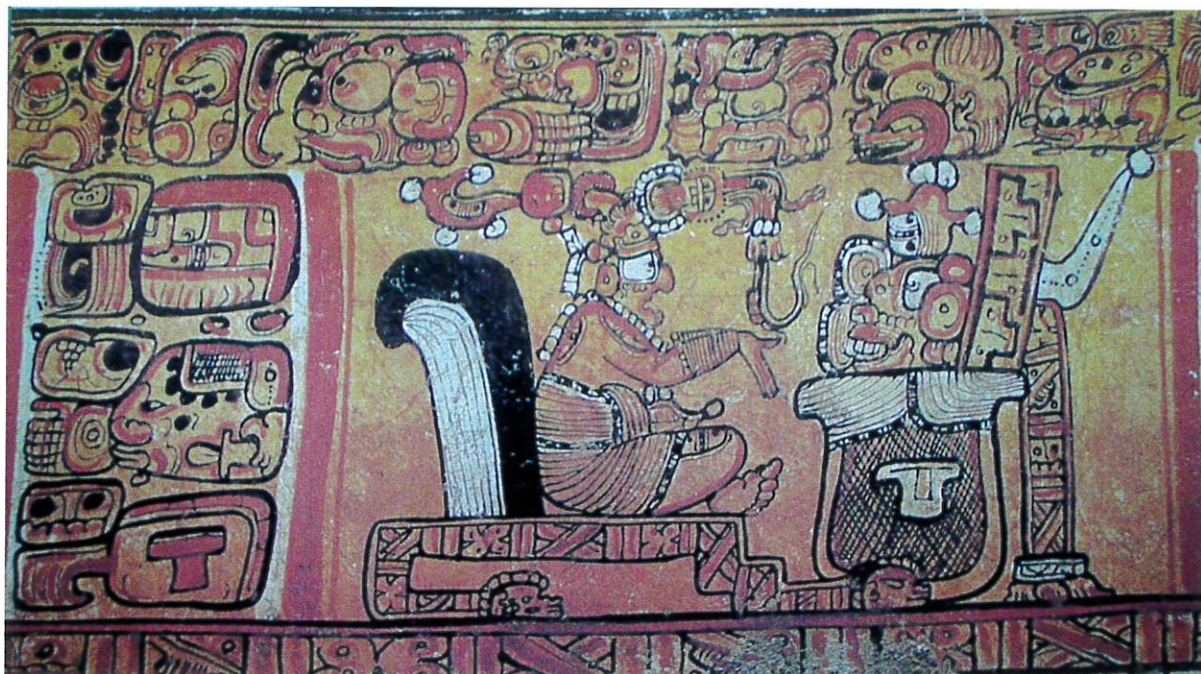
La seconde de nos hypothèses nous a été suggérée par Cardon<sup>10</sup>. Les techniques de teintures traditionnelles à l'indigo dites « primitives » utilisaient des trous creusés dans la terre ou *fosses enterrées* pour recevoir les feuilles fraîches de plantes à indigo. Il suffit que ces fosses aient été creusées dans un sol argileux pour envisager très simplement la rencontre de l'argile et de l'indigo. Dans sa simplicité, cette hypothèse nous semble la plus vraisemblable.

Ces trois hypothèses proposent des explications plausibles sur la manière dont aurait pu germer l'idée de fabrication du pigment bleu à partir d'argiles. Le pigment obtenu, une laque d'indigo, possède déjà la couleur bleu turquoise. Pourquoi ont-ils imaginé la cuisson de cette laque ?

---

<sup>9</sup> GARCIA, M. communication personnelle. Association Couleur Garance, Lauris, France

<sup>10</sup> CARDON, D., CHATENET, G. *Guide des teintures naturelles*, éd. Genève : Delachaux et Niestlé, 1990.



Dieu Itzamná sur un trône céleste, inventeur de l'écriture et « premier scribe »

Fig. 17 : Détail d'un panoramique, vase polychrome.  
Classique récent  
Terre cuite peinte ; h. 20 cm, diam. 17 cm ; collection privée  
© 1997 Justin Kerr



Dieu Pawahtún, protecteur des scribes, portant la coiffure ornée d'un filet qui le caractérise, en train d'enseigner dans une école de scribe. Un pinceau est piqué dans le filet qui le coiffe.

Fig. 18 : Détail d'un panoramique, vase de style codex.  
VIII<sup>e</sup> siècle  
Terre cuite peinte ; h. 9,7 cm, diam. 19,2 cm ; collection privée  
© 1997 Michael D.Coe

# 4

## De l'emploi des couleurs dans le monde préhispanique. Discussion sur les peintres mayas

L'ampleur de la palette du peintre maya est surprenante : les artistes produisirent de nombreuses couleurs en variant tonalités, clartés, saturations, superpositions. Le monde des couleurs de la période classique décrit à l'aide de riches détails des scènes fortement réalistes : par exemple les attributs des personnages qui leur donnent leur individualité. La couleur est utilisée comme moyen d'expression plastique : on trouve dans les peintures de Bonampak des effets de mouvement et de volume grâce aux transparences, aux opacités et à la texture lisse ou rugueuse des couches picturales. Ce langage de la couleur participe intimement à la valeur artistique des peintures.

Mais qui sont les mayas qui parlent ce langage de la couleur ? Y avait-il des écoles picturales garantes de la tradition, ce qui pourrait expliquer la constance des couleurs utilisées dans différents sites ?

### Le statut du peintre

Tout comme les autres cultures du monde, la civilisation maya considérait que les dieux étaient les premiers grands artistes, et qu'ils enseignaient aux humains la prestigieuse tâche. Dans les codex, nous pouvons observer *Itzamna*, « dieu suprême » avec un encrier et des pinceaux dans la main. De même nous pouvons voir fréquemment sur les vases de la période classique des hommes ou des êtres fantastiques portant des plumes, des pinceaux ou des encriers-coquillages en train de réaliser des sculptures ou d'écrire sur des codex. On reconnaît également les peintres au fait qu'ils portent dans leur chapeau des pinceaux qui peuvent être représentés de manière réaliste ou symboliquement en imitant le bouton de la fleur de nénuphar. Par extension cette fleur blanche couramment connue sous le nom de lys aquatique ou *naab*, en maya, se réfère au peintre.

Les scribes mayas pouvaient être roi ou aristocrates. Le souverain qui figure sur ce vase porte les plume du *ah k'u hun*, « gardien des livres sacrés », piqués dans sa coiffure. Le lotus planté dans ses cheveux pourrait symboliser le pinceau des calligraphes mayas. Sa coiffure est rehaussée de bleu maya.



Fig. 19 : Vase polychrome où figure un souverain vêtu en *ah k'u hun*  
Collection Dumbarton Oaks Collections, Washinton D.C.  
VIII<sup>e</sup> siècle  
© 1997 Justin Kerr

Les premiers travaux reconnaissant le rôle du peintre ou « *ah ts'ib* » ou de l'artiste « *its'at* » sont ceux de Michael Coe<sup>1</sup> qui grâce au déchiffrement de l'écriture hiéroglyphique ont permis de reconnaître des signatures et le nom de quelques peintres.

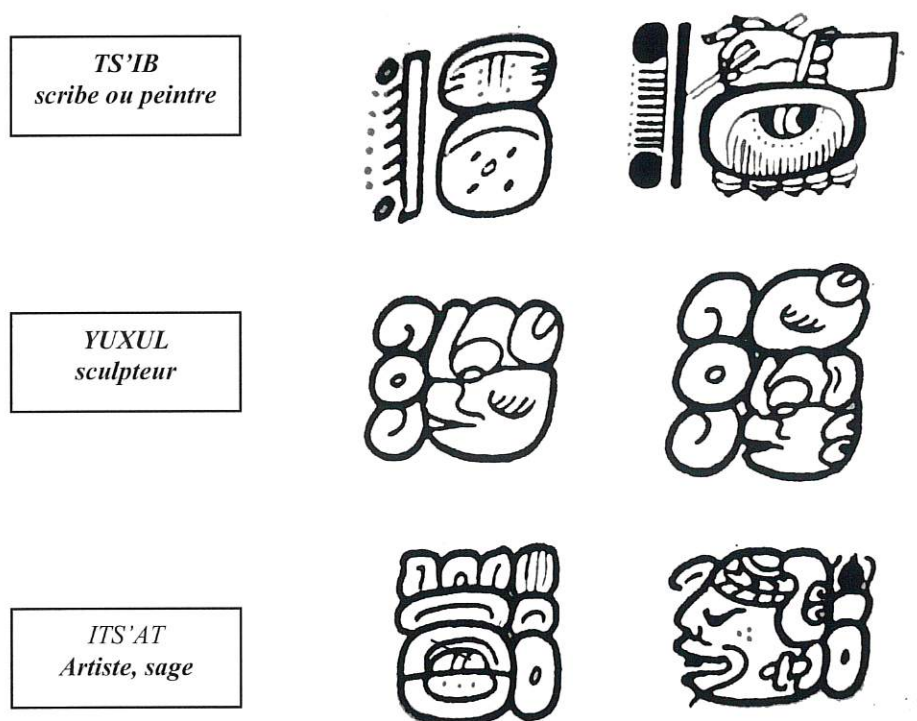
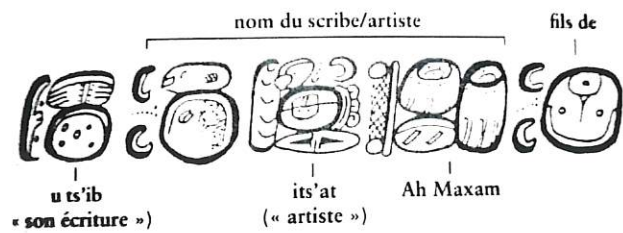


Fig. 20 : Variantes des hiéroglyphes maya désignant le scribe, le peintre et le sculpteur.

Sans aucun doute la signature ou l'autoportrait comme à Bonampak, de ces artistes sont l'évidence de l'existence de grands maîtres de la peinture maya. En général le nom est précédé du préfixe *ah ts'ib* (peintre) ou du possessif *u ts'ib* (sa peinture). L'un des peintres les plus connus fut Ah Maxam, son nom est annoté sur un vase ainsi que celui de ses parents : un gouverneur de Naranjo et une noble de Yaxhá. Le gouverneur de Copàn *K'ak'Naab'K'awil* (628-695 p. C) fut peintre et dans sa tombe fut retrouvé un vase rempli de pigment rouge et décoré avec la tête du dieu Mono, patron des artistes. De sa bouche émergeaient des pinceaux. Le titre suprême pour un artiste maya était d'être *ah' k'u hum*, «celui des livres sacrés».

<sup>1</sup> COE, M. *L'art maya et sa calligraphie*. éd. Paris : de la Martinière, 1997. 240 p.



Vase peint par Ah Maxam, talentueux scribe de Naranjo. La séquence standard principale autour du bord indique que ce récipient est destiné au chocolat. Sur la base, un deuxième texte donne le nom du scribe, ses titres et sa lignée royale.

Fig. 21 : Vase peint en noir sur blanc.  
Classique récent  
© 1997 Justin Kerr



Fig. 22 : Conque-encrier portant des restes de *ch'oben*, une peinture à l'hématite. La date du calendrier circulaire, gravée au dessous, correspond au 17 mars 761  
© 1997 Justin Kerr

Les peintres pouvaient être des femmes, et ce fut souvent le cas à l'époque Classique, les vases mentionnent *Na Tzib Chaan* (dame scribe céleste), *Na Balam Ahau* (dame gouvernante jaguar).

Ces exemples montrent que le métier de peintre était réservé à une élite sociale.

## L'apprentissage

Sahagun relate que le peintre de codex, de sculpture, de temple, de céramique et le teinturier sont dans la société maya des individus éduqués au sein des *Calmécacs*, sorte d'école sacerdotale ou en plus de l'enseignement religieux, était dispensé l'apprentissage de l'art de peindre. Cet apprentissage ne se limitait pas à l'application des couleurs, il incluait aussi la préparation des pigments. Les futurs «peintres-moines», rentraient très jeunes dans ces écoles et menaient une vie pleine de restrictions dédiée aux dieux et à leurs pairs. Le frère Diego Duran<sup>2</sup> rapporte que les jeunes novices apprenaient aussi l'art militaire, l'astronomie et l'art de gouverner s'ils étaient fils ou fille de gouvernants.

La connaissance de la religion permettait la compréhension des images et des figures divines. En effet, la réalisation d'un codex sous-entendait de maîtriser parfaitement l'iconographie, la nature et la position des couleurs ainsi que leurs significations. En effet seuls les nobles ou les rois avaient le droit d'être parés de couleurs et il y avait des distinctions entre eux : après les dieux celui qui portait le plus de couleurs était le roi. Ses vêtements étaient confectionnés par des ateliers spécialisés et la production de tout artefact comme les plumes ou l'orfèvrerie était contrôlée par les maîtres des *Calmécac*<sup>3</sup>.

A la fin de leur éducation les peintres pouvaient intégrer les ateliers du roi ou travailler à leur compte à la décoration d'objets que le peuple était autorisé à l'utiliser. La qualité des artistes pouvait faire l'apanage d'une cour, puisqu'il pouvaient être emmenés comme tribut de guerre. Le cas le plus célèbre pourrait bien être celui de Cacaxtla dont les peintures, qui racontent une écrasante défaite maya, sont pourtant exécutées en plein territoire étranger, dans un style si sûr et si purement maya qu'il ne peut être attribué qu'à des virtuoses de cette civilisation.

---

<sup>2</sup> DURAN, D. *Historia de las Indias*. 1588, tome 1, Madrid, Bibliothèque Nationale. p. 191.

<sup>3</sup> TORQUEMADA, Fray Juan de. *Monarquia indiana*. livre 1, chap XI, pp 10-31 ; livre IX, chap VIII, p 181.





Le hiéroglyphe de son père Un Munahpù, le jeune dieu du Maïs, est inscrit autour du plat : une allégorie puisque ce type de plat contenait d'ordinaire des tamales de maïs

Fig. 23 : plat polychrome représentant Hunahpù en train d'écrire dans un livre recouvert d'une peau de jaguar  
Classique récent  
© 1997 Justin Kerr

L'art pictural maya était soumis à une codification rigoureuse. Assimilé à un langage symbolique et métaphorique, et même à une véritable écriture iconique, il est soutenu par une grammaire spécifique qui utilise toutes les composantes de l'image, dans une expression multiforme et complexe. Choix des couleurs, plasticité des formes, structures de la composition, organisation d'axe de symétrie, perspective artificielle, emplacement sur le mur et orientation sont autant de moyens graphiques qui se combinent pour organiser un récit, transmettre des idées, des métaphores et des jeux de symboles.

Dans ce cadre étroit la virtualité de l'artiste s'exprime surtout par la qualité de sa ligne et son habileté à manipuler les conventions formelles et colorées.

Détenteurs de la tradition, initiés dès leur plus jeune âge à la technique et aux formes qui se transmettent de génération en génération, les peintres mayas avaient donc un statut important dans la société. La tâche primordiale des créateurs n'était pas de composer un décor mais d'élaborer une mise en scène porteuse d'un message. Peindre était un geste sacré, assimilé au verbe créateur. La couleur elle aussi était investie d'un rôle et d'un statut particulier, intimement lié à son caractère symbolique que nous allons développer maintenant.

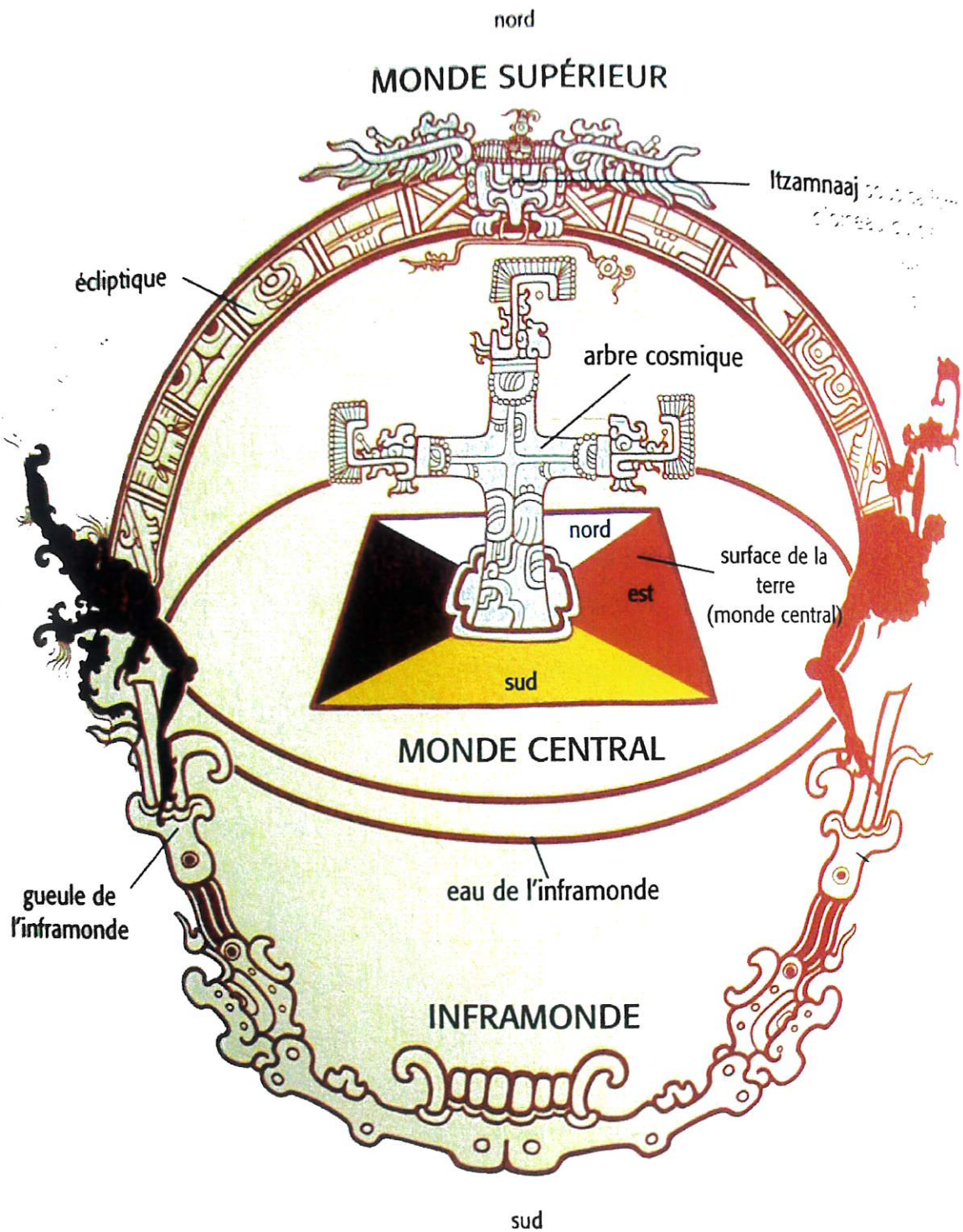


Fig. 24 : Une représentation du monde chamanique. Reconstitution basée sur les inscriptions de Palenque et du codex de Dresde

# 5

## Le bleu et le symbolisme des couleurs préhispaniques

Dans le monde préhispanique les couleurs jouent un rôle fondamental, et la survivance de ces couleurs dans le Mexique contemporain en est un signe encore vivant. Nous pouvons déchiffrer ces significations latentes dans les surfaces colorées qui resplendissent aux quatre coins du monde maya, des maisons éclatantes accrochées aux pentes brumeuses des «Montes azules», aux églises somptueuses surgies du sol détrempé du Tabasco, et aux cimetières de la péninsule desséchée du Yucatán, fleuris à coups de pinceaux.

La couleur a toujours été profondément liée aux conceptions symboliques de l'être humain. La structure de leur image du monde rejoint largement celle du chamanisme décrite par l'historien de religions Mircea Eliade<sup>1</sup> : quatre côtés et un axe central reliant les niveaux cosmiques ciel, terre et inframonde. Dans les écrits mayas, la surface de la terre est un carré avec un centre très marqué. Elle nage sur un océan formant la frontière avec l'inframonde.

Le *Popol Vuh*<sup>2</sup> relate que les dieux de la création tracèrent un carré avec une corde à mesurer afin de déterminer l'étendue de la voûte céleste et de la terre. Les côtés de ce monde divisé en quatre sont orientés selon les quatre principaux points cardinaux ; les coins sont déterminés par les endroits où se lève et se couche le soleil aux solstices d'hiver et d'été. Au centre de chaque côté se dresse une montagne mystique avec une caverne à l'entrée de laquelle se trouve un arbre. Les accès à l'inframonde se trouvent ici, recouverts de l'océan originel mythique. Du centre du monde partent quatre chemins menant à ces cavernes et le reliant aux quatre points cardinaux. Tout comme la surface de la terre (monde central), l'océan originel, l'inframonde (monde inférieur), le ciel (monde supérieur) sont eux aussi divisés en quatre et possèdent plusieurs niveaux.

---

<sup>1</sup> MIRCEA, E. *Le chamanisme et les techniques archaïques de l'extase*. éd. Paris : Payot, 1992. 405 p. (collection Bibliothèques historiques).

<sup>2</sup> Livre sacré des mayas-quitchés écrit en quiché et traduit en espagnol vers 1550 qui raconte la genèse et l'évolution du peuple maya.

DESRUISSEAU, P. *Pop Wooh : Popol Vuh, le livre du temps. Histoire sacrée des Mayas quitchés*. éd. Paris : Triptyque Le castor astral, 2002. 249 p. (en collaboration avec AMAYA Daisy).



Fig. 25 : Hiéroglyphes des cinq couleurs symboliques des quatre points cardinaux (haut). Les fromagers (*Ceiba pentandra*) de la jungle du Chiapas au Mexique ; arbres sacrés des mayas qui symbolisent le centre de l'univers (bas). Le nom maya de cet arbre est *Yaxche* ou « arbre vert », à cause de ces feuilles mais également parce que le vert est la couleur du centre du cosmos. Aujourd'hui encore les fromagers sont traités avec respect et ne sont pas coupés lorsqu'un morceau de la forêt vierge est défriché pour cultiver le maïs.

Pour les Mayas, le monde supérieur (*Oxlahuntiku*) est composé de treize cieux, disposés en couches, la terre étant la plus basse de toutes. A chacune de ces régions supérieures, préside un dieu. Le monde inférieur est disposé en neuf couches correspondant également à neuf dieux. Au centre du cosmos se dresse l'arbre cosmique «*Ceiba*», à sa cime se trouve l'oiseau du ciel, représentation symbolique du dieu suprême *Yax Itzam*.

Là où les Mayas modifient l'espace naturel, ils reproduisent toujours le modèle du monde divisé en quatre. Les places, les pyramides, les temples et les palais imitent sous une forme symbolique le paysage légendaire formé par les divinités le jour de la création. Le but de l'aménagement cosmographique d'une ville et son implantation dans une géographie mythique (montagnes, grottes, cours d'eau, cenotes) est de mettre le monde terrestre et l'ordre divin à l'unisson.

## La couleur

Chacun des quatre points cardinaux, ainsi que le centre du monde était associé aux cinq couleurs vitales. Le rouge «*Chac*» du soleil levant à l'Est, essentiel, rayonnait au sommet ; le noir «*Ek*» à l'Ouest où le soleil disparaît pour l'inframonde, le monde des ténèbres ; le blanc «*Sac*» au Nord est rattaché à la lune ; le jaune «*Kan* » au Sud correspond à la direction de la planète Vénus ou du ciel nocturne ; le bleu-vert «*Yax* » au centre de l'univers est la couleur de l'arbre cosmique, de la renaissance et du dieu de la pluie *Chaac*.

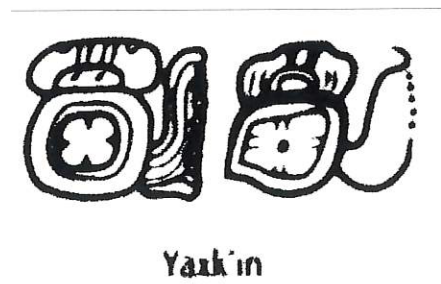
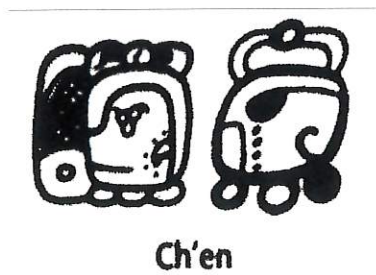
*Chaac* n'est pas forcément considéré comme une déité unique car il est associé aux quatre dieux des points cardinaux, qui eux-mêmes correspondent à une couleur : *Chac Xib Chaac* (l'Homme rouge Chaac de l'Est), *Sac Xib Chaac* (l'Homme blanc Chaac du Nord), *Ek Xib Chaac* (l'Homme noir Chaac de l'Ouest), *Kan Xib Chaac* (l'Homme jaune Chaac du sud).

La couleur du bleu maya est donc liée au dieu de la pluie *Chaac*. Diego de Landa<sup>3</sup> écrit qu'elle intervenait dans des rituels dédiés à ce dieu et ses quatre aspects, durant le mois de *Chen* ou de *Yax* : « les corps des esclaves ou des enfants qui allaient être sacrifiés, étaient peints en bleu...[ ], les cœurs arrachés étaient alors enduits de bleu avant d'être déposés sur la pierre du sacrifice, elle aussi de couleur bleue... ».

La couleur bleue est aussi la couleur du sacrifice. Ce n'était pas la seule cérémonie où les corps étaient badigeonnés de bleu, les chasseurs, pêcheurs et médecins employaient aussi cette couleur dans leurs rituels.

---

<sup>3</sup> LANDA, Fray Diego de. Op. cit



Tous les rituels collectifs étaient accompagnés de musique, de chants et de danses pour préparer les esprits à la rencontre avec les dieux. Les ocarinas, flûtes, tambours marquaient le rythme de ces cérémonies publiques et accompagnaient les rites d'offrandes et de sacrifices.

Fig. 26 : Illustration de rituels de sacrifice maya (haut). Glyphes des mois consacrés à ces rituels (bas).

Landa rapporte que les objets rituels étaient peints avec du bleu maya pour les purifier. Les flèches des chasseurs, les tissus, les onguents et outils des guérisseurs étaient ainsi purifiés.

Yax, la couleur bleu-vert du bleu maya est aussi la couleur du jade, pierre sacrée utilisée dans de nombreux rituels.

Le bleu maya revêt un caractère symbolique fort servant à l'expression plastique des représentations religieuses. Cette valeur symbolique se retrouve jusque dans la préparation du pigment et le choix des matériaux, ou encore son utilisation codée dans les peintures murales.

## L'argile

L'attapulgite de *Sacalum* se trouve sur les parois d'une petite grotte intérieure du *cenote* sacré situé au milieu du village. Les cenotes sont des gouffres ouverts formés par l'affaissement de réseaux souterrains, lieux de culte utilisés par les indigènes comme sources inépuisables d'eau. Rappelons-nous que l'implantation des villages près de certaines montagnes, cours d'eau, grottes ou cenotes n'eut pas lieu pour des raisons uniquement pratiques. Des montagnes avec des grottes à proximité d'une ville furent les pendants des montagnes et grottes mythiques dans lesquelles résident les ancêtres et les divinités. Souvent d'accès périlleux, entourés de crainte et de mystère, les cenotes revêtaient une grande importance pour les civilisations de la Mésoamérique. Bouches de la Terre-mère, entrées naturelles du monde souterrain, les cenotes ou les grottes étaient toujours liés aux grands mythes. Les Mayas allaient chercher l'argile qui servait à fabriquer leur bleu dans les entrailles de la Terre, dans le cenote.

Nous sommes allés à Sacalum pour prélever de l'argiles afin de faire nos expériences de reconstitution. La veine d'argile se situe dans une chambre souterraine secondaire de 300 m<sup>2</sup> et 1 m de haut, au nord du cenote, dont l'accès particulièrement difficile se fait par un boyau de 50 cm de haut. L'extraction de l'argile est particulièrement difficile à cause de la dureté de la veine. Pourtant ces mines furent exploitées de manière intensive à l'époque préhispanique.

L'attapulgite était connue en raison de ses vertus thérapeutiques, tout comme les indigotiers qui apparaissaient comme des plantes magiques et toutes puissantes. D'ailleurs l'argile de sacalum est toujours utilisée de nos jours par la population locale, qui « mange » cette argile pour se soigner.

L'attapulgite possédait déjà en elle-même une connotation symbolique forte. La fabrication du précieux bleu nécessitait l'utilisation de matériaux eux-mêmes précieux.





Fig. 27 et 28 : Sacalum, vue générale de la chambre secondaire où se trouve la veine d'argile. Prélèvement d'attapulgite après localisation de la veine  
© photo Sonia Ovarlez

Nous ne savons rien de la fabrication traditionnelle du bleu chez les Mayas. Mais on peut l'imaginer à partir des documents historiques du XVI<sup>ème</sup> siècle et du dictionnaire de langue maya *Cordemex* qui sont parvenus jusqu'à nous. En particulier, celle de la fabrication de la chaux vive nous semble révélatrice de l'état d'esprit dans lequel ces fabrications étaient entreprises.

*K'ula'n* « la plus forte de toute » est le nom maya de la chaux. La plus forte de toute, car la chaux donne des solutions alcalines qui furent très utilisées dans la culture traditionnelle préhispanique pour des tâches courantes comme la fabrication des tortillas (galettes de maïs) ou des codex. *Chuh la'an* désigne le four où était calciné le carbonate de calcium pour donner la chaux vive. Ce phénomène possède une connotation magico-religieuse, ce processus de transformation de la matière par le feu, pour améliorer les qualités de la matière, est une conception hautement symbolique chez les Mayas : *Chuh* signifie sacrifier ou sacrifier quelque chose au feu. Il existait des incantations qui accompagnaient la préparation de la chaux, explique Hernando Ruiz de Alarcon<sup>4</sup> et chaque instrument était évoqué dans les paroles magiques : la hache qui coupe le bois pour donner le feu, le feu qui donne la vie à la dame blanche (chaux), et le vent qui fait prendre et maintient le feu :

« *Ven viento. Ven para que despiertes à mi padre,  
cuatro cana, apresurate.  
Que estas haciendo ?  
Si solo te apresuraras, Mujer blanca nacera.  
La veremos à la cara... »*

*Viens le vent. Viens pour réveiller mon père (feu).  
...Dépêches-toi.  
Mais que fais-tu ?  
Si tu te dépêches, la dame blanche naîtra.  
Nous verrons son visage...*

Faire de la chaux était donc un acte reliant magie et science des matériaux. Ainsi ceux qui préparaient la chaux et dirigeaient le processus de cuisson étaient tous comme les peintres de haut rang social et avaient un statut important. Ils étaient initiés à la transformation des roches blanches de la terre mère pour édifier et décorer les temples et résidences.

---

<sup>4</sup> RUIZ de ALACRON, H. *Treatrise on the Healthen Superstitions and Costumes that Today Live Among the Indians Natives of this New Spain*. [1629], éd. Oklahoma: Oklahoma University Press, 1984. Traduction nahuatl-anglais de Andrews, Richard et Ross Hassing.

Le bleu maya lui aussi fait intervenir un processus de cuisson qui s'avérait d'autant plus complexe, nous le verrons dans le chapitre suivant, si l'on voulait obtenir différentes tonalités de bleu-vert. La connaissance des matériaux et la maîtrise des « éléments » comme le feu étaient primordiales pour l'obtention de belles couleurs. L'état d'esprit de l'artiste est le même, qu'il fabrique le bleu maya ou la chaux. C'est une manière de penser les matériaux, c'est une conception symbolique. Tout comme la chaux, le bleu maya lui aussi était sacrifié au feu et subissait des transformations visibles par les changements de couleurs, avant de prendre place dans le langage symbolique de la couleur lors de la décoration des temples, codex et céramiques.

Tous les paramètres, comme nous les appelons aujourd'hui, devaient être contrôlés et consignés sous forme de recettes ; sinon comment expliquer l'invariance des couleurs utilisées pour la représentation d'objets spécifiques comme les plumes ou les boucles d'oreille dans des sites ou des époques différentes ?

En effet le bleu maya répondait aussi à des codes d'usages comme nous pouvons le voir à Bonampak dans la chambre 1, où pour suggérer une scène mythique<sup>5</sup> qui se déroule dans le monde des dieux, les peintres ont utilisé un bleu turquoise clair très transparent, un bleu représentant l'immatérialité, l'eau et probablement symbolisant un lavement et un sacrifice rituel en rapport avec la fête du *Yaxkin*. La fête du « nouveau soleil » où était célébrée la cérémonie *Yolob u dzab kam yax* consistait entre autre à peindre les temples de bleu<sup>6</sup>.

Chaque fond qui était peint avec cette tonalité se référait à l'univers des dieux, à quelque chose de divin. De nombreux codes d'usage des couleurs seront développés dans le chapitre afférent à la colorimétrie afin d'étayer les hypothèses déjà exposées ici sur la symbolique du bleu maya.

Nous terminerons en faisant deux remarques : la quantité de bleu maya qui était fabriquée devait être relativement importante. De plus une question reste sans réponse : à qui étaient destinés ces messages picturaux ? Qui, dans le peuple, avait assez d'instruction pour décoder ces messages ?

Les peintures historiques qui mêlent vie quotidienne de la cour et hauts faits militaires ont éventuellement une fonction de propagande destinée à asseoir la puissance et la légitimité d'une dynastie ; par contre les compositions des dalles faitières, tellement cachées dans l'ombre haute des voûtes ne répondent pas à une justification didactique et semblent plutôt adressées aux seules divinités ! Les couleurs étaient donc également destinées aux dieux...

---

<sup>5</sup> LANDA, Fray Diego de. *Op. cit*

<sup>6</sup> Entretien avec D. Magaloni, mars 2003



Nuancier de bleus mayas,  
Série 5 – 313°C, 0.2 ;0.5 ;1% en indigo  
© Photo Sonia Ovarlez

## Chapitre 2

---

### Préparations des bleus mayas





**A**près avoir abordé les questions historiques et symboliques nous avons maintenant une vision plus précise du contexte dans lequel était fabriqués les bleus mayas. Ce chapitre est consacré aux reconstitutions de recettes de fabrication que nous avons mises au point. Nous y discuterons de l'hypothèse d'une recette «historique». Puis nous ferons l'étude systématique de l'influence des divers paramètres de la fabrication sur la couleur obtenue. L'ensemble des échantillons fabriqués constitue un nuancier qui recouvre la palette des couleurs dont disposaient les artistes mayas. Ces étalons de couleurs seront la base de l'étude colorimétrique des bleu-vert mayas présentée dans le chapitre 5. Auparavant, nous ferons le point sur les matières premières.





# 1

## Les matières premières

Comme nous l'avons vu, tout porte à croire que les bleus mayas sont constitués de l'association des composés organiques constituant l'indigo et d'une argile.



### 1 - L'indigo, or bleu des anciennes civilisations

Une des énigmes les plus passionnantes de l'Histoire des Techniques est la découverte, - au moins dès le néolithique, et sur différents continents- de procédés variés pour élaborer l'indigo à partir de plantes elles-mêmes très diverses, et pour le fixer sur un support textile.

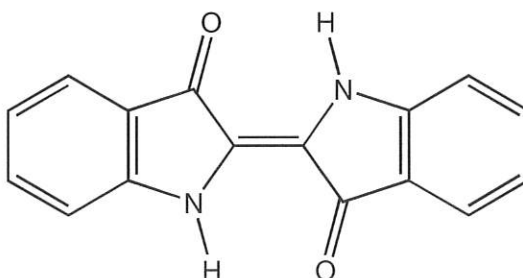
Dans la plante, l'indigo est sous forme d'un glucoside, l'*indican*, précurseur incolore d'un leucodérivé, l'*indoxyle*. Par des réactions successives d'oxygénation il va s'oxyder et donner l'indigotine.

Au sens propre, l'*indigo*, est une fécule bleu foncé à fort pouvoir colorant, extraite par fermentation des feuilles de plantes à indigo (indigotiers, polygonums, crucifères, ...). Il doit sa couleur à deux principes colorants, l'*indigotine* et l'*indirubine*.

#### 1. L'indigotine

Officiellement, c'est la 2-(1,3-dihydro-3-oxo-2H-indol-2-ylidène)-1,2-dihydro-3H-indol-3-one.

Formule brute :  $C_{16}H_{10}N_2O_2$   
Poids moléculaire : 262,27 g.mol<sup>-1</sup>



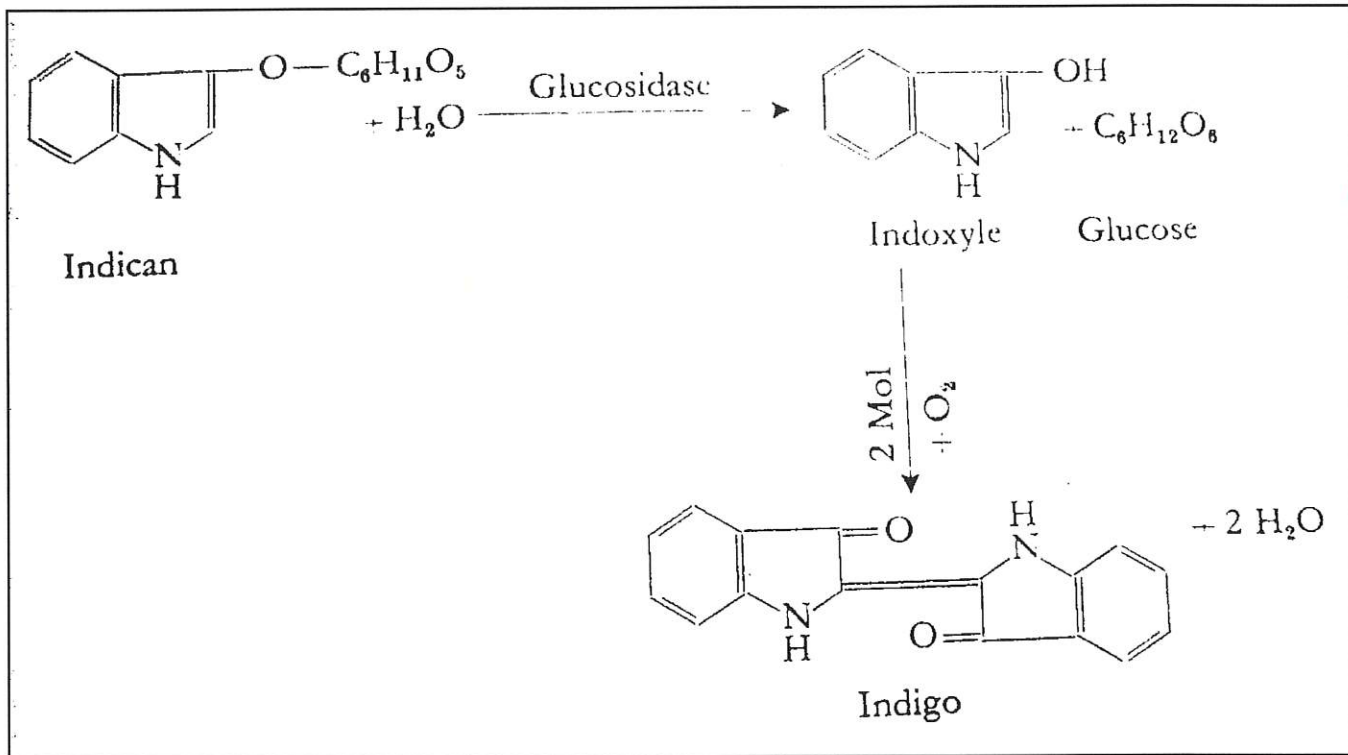


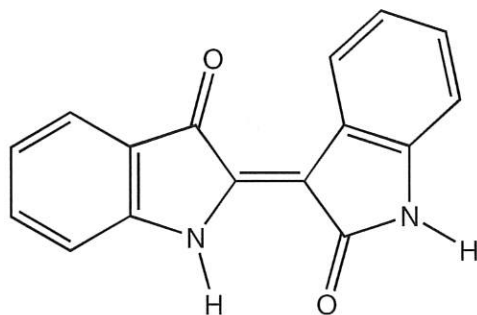
Fig. 29 : Formation de l'indigotine d'après D. Cardon, *Guide des teintures naturelles*, Op. cit.

Du fait de la structure de sa molécule, l'indigotine absorbe sélectivement de la lumière dans le visible. Sa couleur est bleu foncé. L'indigotine existe sous les formes *cis* et *trans*. Si elle est sous forme solide elle est *trans*.

<b>Sublimation :</b>	elle est de l'ordre de 300°C sans décomposition, et à 390°C il est détruit.
<b>Solubilité :</b>	il est insoluble dans l'eau, l'alcool, l'éther, et les acides dilués. Il est soluble dans les solvants non polaires avec une décoloration rouge, et dans les solvants polaires en restant bleu.
<b>Absorption UV-vis :</b>	3 pics caractéristiques $\lambda_{\text{max}}$ : 611, 284, 249 nm dans le DMF.
<b>Absorption HPLC:</b>	2 pics $\lambda_{\text{max}}$ : 204, 228 nm à 285 nm pour un temps de rétention de 34 minutes.
<b>Résistance :</b>	résistant à NaOH, KOH, HCl non résistant à $Na_2SO_3$ , chaux, $HNO_3$ (oxydation en isatan : jaune orangé)
<b>Pouvoir colorant :</b>	bon
<b>Pouvoir couvrant :</b>	faible

## 2. L'indirubine

L'autre colorant présent dans les plantes des genres polygonacées et *indigofera*, qui nous intéressent ici, est l'indirubine. Il s'agit un isomère de l'indigotine. Elle a donc la même formule brute ; ce qui change c'est son orientation dans le plan. Le spectre d'absorption de la lumière dans le visible est différent : l'indirubine est rouge. C'est pourquoi elle fut d'abord appelée rouge d'indigo.



Si l'indigotine prédomine dans les polygonacées, il n'en va pas de même pour les *indigofera*, en particulier pour *indigofera suffruticosa* Miller du Mexique, qui contient environ 80% d'indirubine.

On considère la production d'indirubine comme une condensation de l'*isatine* et de l'*indoxyle*. L'indirubine est liée à la disparition de l'indican présent dans les feuilles d'*indigofera* par chauffage à l'air. En effet cette disparition est accompagnée d'un développement considérable d'indirubine dans les feuilles<sup>1</sup>. L'indirubine a moins d'affinité avec les fibres textiles que l'indigo et ses teintures sont peu solides.

Elle se présente sous forme d'un feutrage de très fines aiguilles brun violet, brillantes, à reflet métallique mordoré, assez peu soluble dans les solvants usuels. Cependant elle est beaucoup plus soluble que l'indigo. Elle est moins oxydable que l'indigo.

<b>Sublimation :</b>	elle fond à 289°C e 300°C sans décomposition, et à 390°C il est détruit.
<b>Solubilité :</b>	elle est soluble dans l'acide acétique et plus difficilement dans les alcools et les éthers avec une coloration rouge foncé. Elle est insoluble dans l'eau

<sup>1</sup> MARTINET, J. Matières colorantes : l'indigo et ses dérivés. éd. Paris : Baillièrre et fils, 1926. 700 p. (Encyclopédie de Chimie Industrielle)

### 3 - Les sources d'indigo en Mésoamérique

Il existe de nombreuses plantes à indigo sur le continent américain, les principales espèces sont présentées dans la table ci-après, issue de l'ouvrage *Artist's Pigment*<sup>2</sup>:

<b>Espèces</b>	<b>Localisation</b>	<b>Epoque</b>
<i>Indigofera suffruticosa</i> Miller	Amérique centrale, Amérique du sud et Amérique du nord	Préhispanique et moderne
<i>Indigofera guatemalensis</i>	Amérique centrale, Amérique du sud et Amérique du nord	Préhispanique et moderne
<i>Indigofera secundiflora</i>	Guatemala	
<i>Fuchsia parviflora</i>	Amérique centrale, Amérique du Sud	Préhispanique
<i>Jacobinia spicigera</i>	Amérique centrale, Amérique du Sud	Préhispanique
<i>Chiropetalum lanceolatum</i>	Amérique centrale, Amérique du Sud	Préhispanique

Tableau V : Sources d'indigo d'origine végétale aux Amériques

Rappelons pour mémoire la possibilité d'emploi de coquillages comme source d'indigo.

### 4 – L'indigo du Mexique

Le principe de l'extraction de la fécule d'indigo décrit dans les sources du XVI<sup>ème</sup> siècle, est le suivant :

- Les plantes fraîchement coupées sont entassées dans une grande cuve. Couvertes d'eau chaude, elles sont laissées à fermenter. Au cours de cette fermentation, nous savons que se produit l'hydrolyse de l'indican en indoxyle.
- Le liquide jaune-verdâtre obtenu est versé dans une deuxième cuve. Généralement additionné d'une substance alcaline, il est ensuite longuement battu. L'oxygène ainsi apporté fait précipiter au fond de la cuve des flocons d'indigo bleus (indigotine et indirubine).
- Ce dépôt pâteux est recueilli au fond d'une troisième cuve. Il est filtré, rincé, égoutté, pressé dans des moules qui lui donnent sa forme commerciale de pains ou *carreaux*.

Il faut une grande quantité de feuilles pour obtenir un pain d'indigo mais, au vu de son fort pouvoir colorant, il faut peu d'indigo pour fabriquer du bleu maya.

<sup>2</sup> SCHWEPPE, H.1997. Indigo and woad. In *Artists' pigments: A handbook of their history and characteristics*, vol. 3, ed.E. W.Fitzhugh. Washington, D.C.: National Gallery of Art. 81–107.

L'analyse élémentaire EDX<sup>3</sup> montre que de tels pains contiennent environ 98% en poids de matière organique. La chromatographie liquide à haute performance (CLHP) montre qu'il s'agit majoritairement d'indirubine, et d'indigotine<sup>4</sup>. Le résidu minéral semble être constitué de phosphate de calcium et de silice.

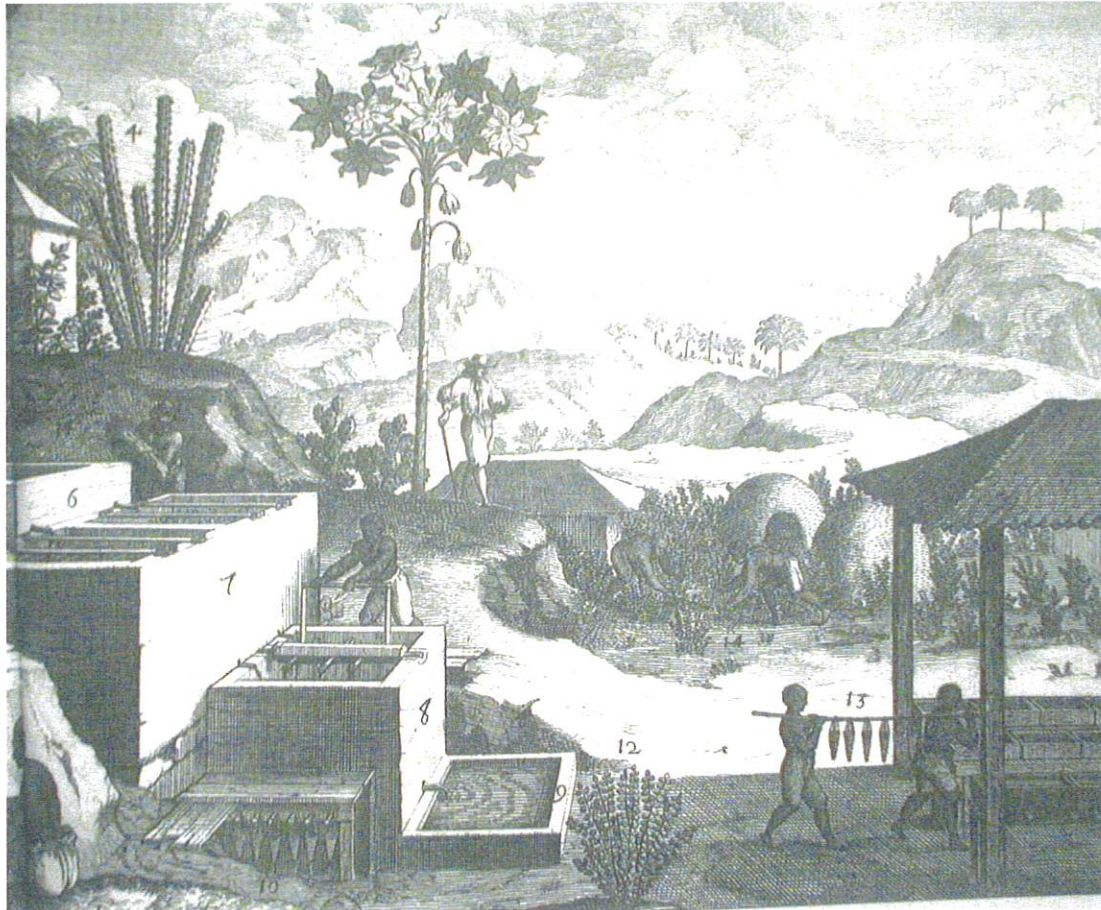


Fig.30 : Indigoterie aux Antilles vers 1660  
Planche gravée par Sébastien Leclerc pour l'ouvrage du père Du Tertre, *Manière de faire l'indigo*,  
Paris 1667-16671, 3 vol.  
© BNF, Dép. des estampes

<sup>3</sup> Analyses faites à l'Ecole des Mines de Paris (CEMEF) par M. Repoux.

<sup>4</sup> Analyses réalisées par M. Hovanessian à l'Université d'Avignon.





## 2 - L'argile, le support indispensable

Avec le silex et les pierres taillées, l'argile est le plus ancien matériau utilisé par l'homme. Et c'est sa propriété fondamentale de faire pâte avec l'eau et de se laisser modeler qui fut ainsi exploitée.

Les argiles sont des silico-aluminates pouvant contenir du magnésium et du fer. On distingue actuellement trois grandes familles : les feuilletés à deux couches (*kaolinites, halloycites*), les feuilletés à trois couches (*illites, glauconies, smectites*) et les pseudo-phyllites anciennement appelées argiles fibreuses (*palygorskites*). Ce sont surtout ces dernières qui nous intéressent. Elles se divisent en *attapulgites* et en *sépiolites*.

PRINCIPALES FAMILLES		ESPECES MINERALES		
		Composants minéraux		
		Si et Al	Si et Mg	Si et Fe
<i>Minéraux à 2 couches</i>		kaolinite dickite halloycite	antigorite	Greenalite Berthiérine
<i>Minéraux à 3 couches</i>	Illites	Illite Vermiculite	Ledikite Saponite	Glauconite
	Montmorillonites	montmorillonite beidellite	Stevensite	Nontronite
	Chlorites	sudoite	Perminite	Thuringite
	Pyrophyllites et talc	Pyrophyllite	talc	
	Interstratifiés	Illite-montmorillonite	Corrensité	Berthiérine-chlorite
<i>Pseudo-phyllites (palygorskites)</i>		<b>attapulgite</b>	<b>Sépiolite</b>	

Tableau VI : Classification des argiles- Encyclopédie Universalis

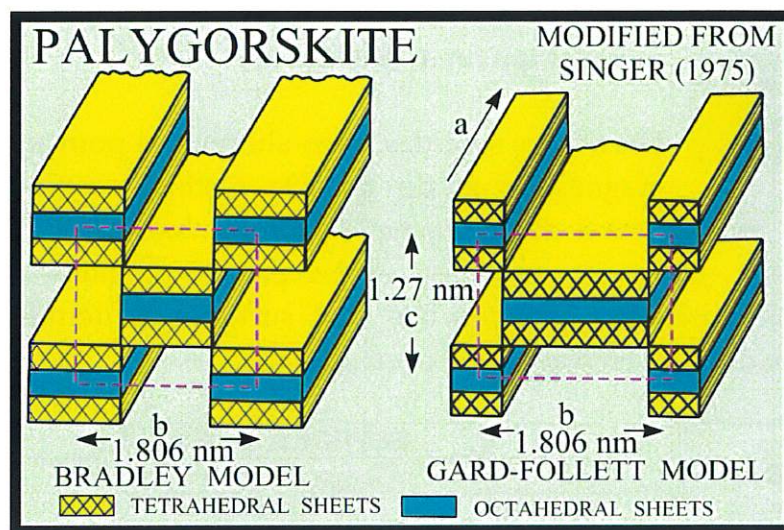
Les minéraux associés aux palygorskites sont la calcite et d'autres argiles comme le kaolin, la montmorillonite qui sont souvent situées dans la même formation géologique. L'attapulgite se trouve également associée à la serpentine, un phyllosilicate, très exploitée dans le monde préhispanique comme substitut du jade.

L'attapulgite et la sépiolite se distinguent des autres minéraux argileux par leur structure particulière dite « *en brique creuse* ». En effet, elles sont composées non pas d'un empilement de feuilletés mais de rubans alternant avec des espaces vides.

Les rubans sont un agencement de sites tétraédriques et octaédriques de type tétraèdre/octaèdre/tétraèdre (TOT). Ils contiennent cinq positions octaédriques pour l'attapulgite occupées par  $Mg^{2+}$  ou  $Al^{3+}$ , et huit positions octaédriques pour la



sépiolite occupées par  $Mg^{2+}$ . C'est dans ces briques creuses que se trouve l'eau zéolitique formée par les molécules d'eau liées par coordination aux ions  $Mg^{2+}$  ou  $Al^{3+}$ .



**Formule brute de l'attapulgite :**  $(Mg, Al)_2 Si_4 O_{10} (OH) \cdot 4(H_2O)$   
**Poids moléculaire :** 411,35 g.mol<sup>-1</sup>  
**Composition :** 8,86 % Mg – 3,28 % Al – 27,31 % Si – 2,21 % H – 58,34 % O.  
**Système cristallin:** Monoclinique - Prismatique H-M Symbol (2/m)  
**X Ray Diffraction:** By Intensity(I/I<sub>0</sub>): 3.23(1) 10.5(1) 4.49(0.8)  
**Couleur :** blanc, grise ou légèrement jaune  
**Synonyme:** palygorskite

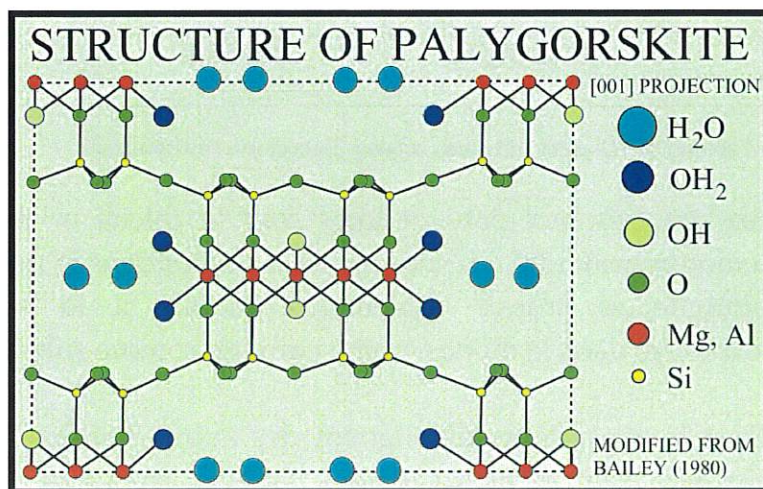


Fig. 31 et 32: Structure en brique creuse de l'attapulgite<sup>5</sup> et structure d'un ruban, coupe schématique.

<sup>5</sup> en anglais attapulgite se dit « palygorskite »

**Formule brute de la sépiolite :**  $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6(H_2O)$   
**Poids moléculaire :** 613,82 g.mol<sup>-1</sup>  
**Composition :** 15.84 % Mg– 27.45 % Si–1.97 % H–54.74 %O.  
**Système cristallin:** Orthorhombique - Bipyramidal H-M  
 (2/m 2/m 2/m)  
**X Ray Diffraction:** By Intensity(I/I<sub>0</sub>): 12.3(1) 2.58(0.6)  
 4.4(0.35)  
**Couleur :** blanc, grise ou légèrement jaune  
**Synonyme:** écume de mer

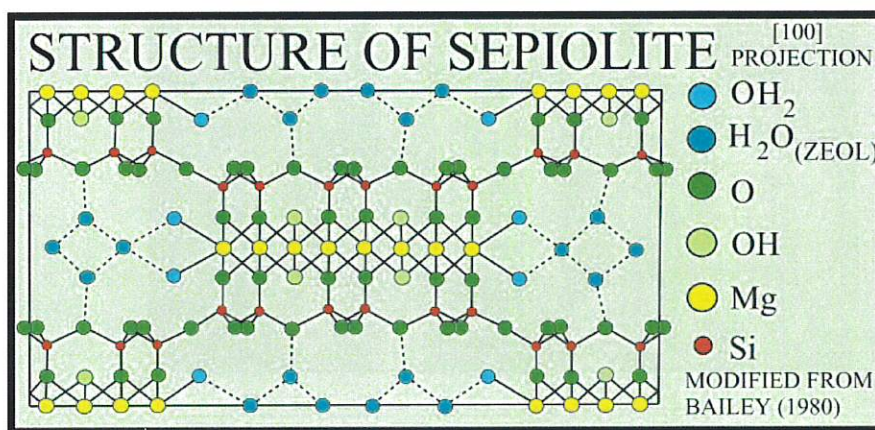
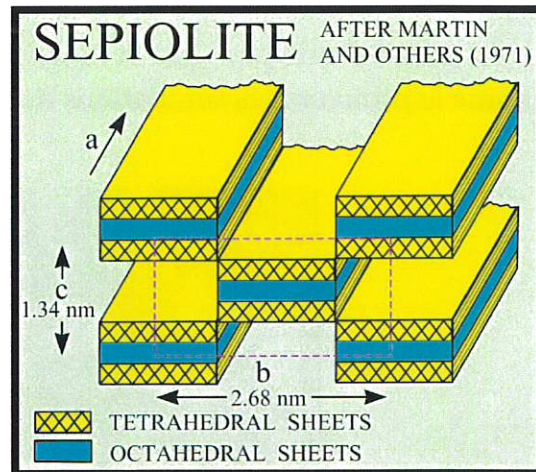


Fig. 33 et 34: Structure en brique creuse de la sépiolite et structure d'un ruban, coupe schématique.

Notons que la composition élémentaire et la structure des palygorskites varient en fonction de leur origine géographique.

La propriété qui nous intéresse plus particulièrement ici est la faculté que possèdent les argiles d'accepter dans leur structure des molécules organiques, c'est-à-dire de petites molécules, mais ayant quand même un certain encombrement stérique. Si cette faculté d'accueil ne pose guère de problèmes avec les argiles à feuillets comme les montmorillonites (l'introduction des molécules étrangères entre les feuillets provoquant alors le gonflement de l'argile), il n'en va pas de même avec les palygorskites. En effet, avec celles-ci, l'accès à l'intérieur de la structure ne peut se faire qu'à travers l'entrée des canaux (les briques creuses) de dimensions nanométriques.

Il faut d'une part que la molécule puisse entrer : c'est le cas pour l'indigotine, comme le prouvent les simulations numériques.

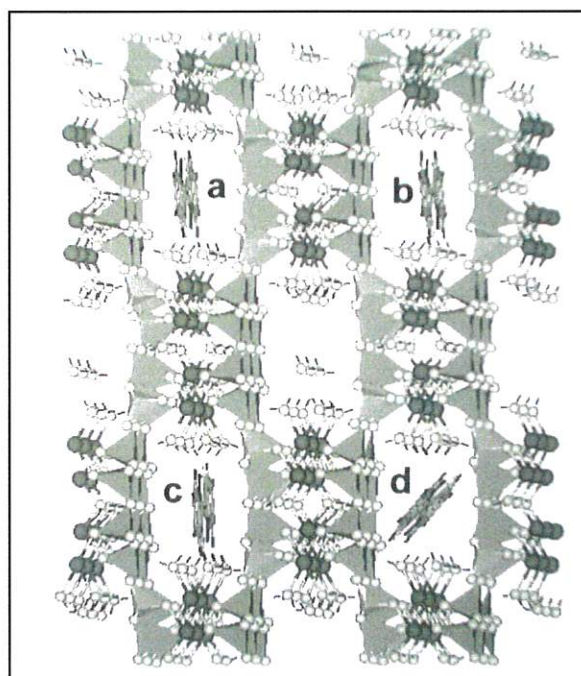
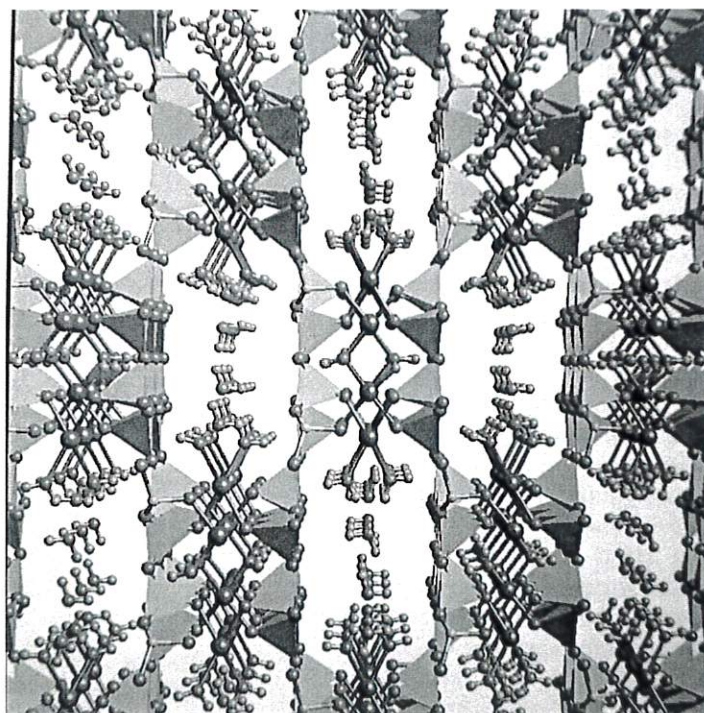


Fig. 35 et 36 : Simulation numérique de l'attapulgite avec son eau zéolitique ; et simulation de l'indigotine dans les anaux de l'attapulgite après le départ de l'eau zéolitique, d'après Fois<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> FOIS, E. op. cit

Mais est-ce aussi le cas pour l'indirubine ? Il faut ensuite que le nombre de canaux débouchant à l'extérieur, en contact avec la solution colorante soit suffisamment grand pour que cette absorption / adsorption se traduise par un effet optique, une couleur bleue.

Or l'attapulgite et la sépiolite diffèrent pour chacun de ces paramètres.

	<b>attapulgite</b>	<b>sépiolite</b>
Dimension du canal (coté)	3,4 x 6,4 Å <sup>2</sup>	x 1,2 ( ? )
Longueur des fibres	2 - 5 µm	5 - 10 µm

Tableau VII: Dimensions des canaux des palygorskites

La sépiolite a donc des canaux plus largement ouverts ; mais elle présente moins d'extrémités au contact du milieu extérieur. Il est possible que ces deux argiles se comportent de manière différente.



Fig. 37 : photo en microscopie électronique à balayage , rubans de l'attapulgite dont l'apparence lui donna anciennement le nom d'argile fibreuse.  
© l'Oréal





### 3 - La cuisson ou le secret du bleu maya...

La première, Masschelein-Kleiner a montré que l'inertie chimique du bleu maya n'était obtenue qu'à la condition de le chauffer à une température supérieure à 150° C.

Une autre propriété des palygorskites qui nous intéresse est donc leur comportement au chauffage.

Le premier effet est la perte d'eau. On sait que la structure de ces argiles contient deux sortes de molécules d'eau, l'eau de constitution et l'eau zéolitique contenue dans les canaux. Des études de thermogravimétrie<sup>7</sup> ont montré que cette dernière part dès 150° C, et a complètement disparu à 300° C. L'eau de structure, plus fortement liée, commence à partir vers 200° C, et a pratiquement disparue à 400° C. On sait que ces différentes molécules d'eau peuvent être remplacées par des molécules d'indigotine<sup>8</sup>.

Le deuxième effet (qui n'est jamais mentionné dans la littérature) est une augmentation de diamètre des canaux. Jusqu'à 400° C, cet effet est réversible, comme s'il était simplement dû à la dilatation thermique. Au delà de 400° C, l'effet devient permanent. Cet effet est actuellement utilisé dans l'industrie pharmaceutique pour augmenter la capacité d'absorption de l'attapulгите, ou bien pour permettre à de plus grosses molécules organiques d'entrer dans les canaux<sup>9</sup>.

Une autre technique actuellement utilisée donne des résultats équivalents, l'extrusion. C'est un procédé de mise en forme dans laquelle l'argile est malaxée, cisailée par une ou deux vis avant d'être forcée de s'écouler à travers une filière.

La cuisson au-delà de 150° C. est donc l'étape qui permet l'obtention d'un pigment stable. Pour des températures inférieures, l'indigotine n'est pas vraiment fixée dans les canaux, encombrés qu'ils sont d'eau zéolitique. Elle se fixe plutôt en périphérie mais est beaucoup moins liée à l'argile. La quantité d'indigo fixée est de plus moins importante ; les couleurs obtenues sont plus pâles.

<sup>7</sup> ARTIOLI, G., GALLI, E. N. Jb. Miner. Mh 5 (1994) 217.

<sup>8</sup> FOIS. Op. cit.

<sup>9</sup> Communication de D. Fayolle, Sté Expansia, l'Isle-sur-la-Sorgue.

Pour vérifier ces observations, nous avons effectué des essais de résistance à l'acide nitrique bouillant<sup>10</sup> d'échantillons de bleus mayas artificiels<sup>11</sup>, synthétisés par la voie sèche (voir ci-après) à partir de mélanges d'indigo du Mexique et de palygorskites, cuits aux deux températures de 120 et 190°C.

% indigo du Mexique	Nature et origine de l'argile	Température de cuisson en °C	Résistance à l'acide nitrique bouillant
5	Attapulgite	120	non
5	Attapulgite	190	oui
10	Attapulgite	120	non
10	Attapulgite	190	oui
5	Sépiolite	120	non
5	Sépiolite	190	oui
5	Montmorillonite	120	non
10	Montmorillonite	190	non

Tableau VIII : Influence de la température de cuisson et du pourcentage d'indigo par rapport au poids d'argile sur la résistance de la couleur du bleu maya à l'acide nitrique bouillant. Les palygorskites proviennent de la mine de Mormoiron (Sté. Expansia). Le temps de cuisson est de 5 heures.

On constate que seuls les bleus mayas synthétisés à 190°C résistent à l'attaque. Les pigments préparés à 120°C subissent le même changement de couleur que l'indigo pur : ils deviennent brun orangé.

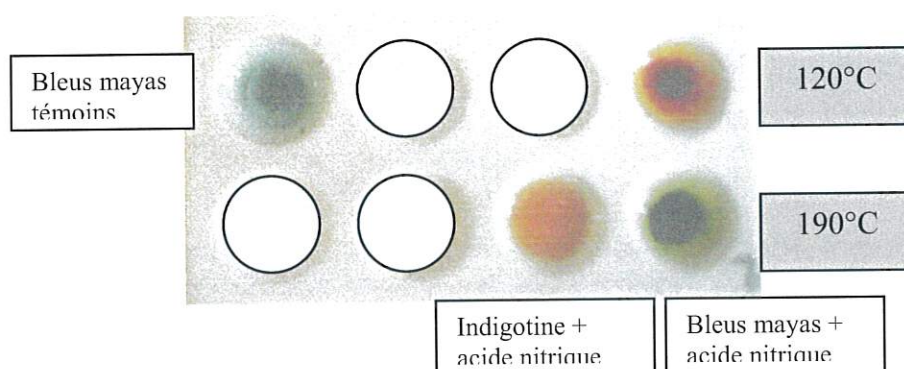


Fig. 38 : Test de résistance des bleus mayas à l'acide nitrique bouillant

<sup>10</sup> L'acide nitrique est un oxydant fort. Il oxyde l'indigo en isatan et le décolore en brun-orangé.

<sup>11</sup> Le choix de ces pourcentages et temps de cuisson correspondent à une première approche basée sur les travaux de L. Massechelein-Kleiner.

Remarque : on peut penser que plus le pourcentage d'indigo utilisé pour la préparation est élevé, plus la quantité d'indigo susceptible d'être fixée est grande. En fait, pour un pourcentage de l'ordre de 10%, on note qu'un pigment cuit à 190°C présente une très légère atténuation de la teinte lors du test de l'acide nitrique bouillant à chaud et un surnageant vert (isatan + bleu maya). Cela correspond probablement à une certaine quantité d'indigo non fixée et donc attaquée.

Nous comprenons pourquoi la nature de l'argile est si importante, ce phénomène n'est possible qu'en raison de la structure particulière des palygorskites. D'ailleurs, le test à l'acide nitrique bouillant ou le test de résistance à la chaleur sur des bleus mayas fabriqués à partir de montmorillonite donnent un résultat négatif.

Un deuxième test, celui de résistance à la chaleur a été effectué. Le pigment est placé sur une platine chauffante où son comportement est étudié sous microscope jusqu'à des températures de l'ordre de 300°C (température de sublimation de l'indigo). Aucune altération n'est constatée avec les bleus mayas fabriqués à 190°C alors qu'un brunissement analogue à celui de l'indigo placé dans les mêmes conditions est noté pour ceux synthétisés à 120°C.

C'est à partir de ces observations que nous nous sommes lancés dans des expériences de fabrication des bleus mayas.





# 2

## Premières expérimentations : voie sèche ou voie humide ?

### 1 – Les recettes modernes

Elles sont assez nombreuses, et manquent de cohérence. On en jugera.

#### Recette n°1<sup>12</sup>(avec le colorant réduit [leucodérivé] et soluble)

Mélange d'attapulгите et de leucodérivé d'indigo pour obtenir une pâte.  
Humidification régulière de cette pâte brunâtre pendant 10 jours qui vire au bleu foncé. Rincer à l'eau et faire décanter (plusieurs cycles). Cuire le résidu pendant 20 heures à 150 °C.

#### Recette n°2<sup>13</sup> (sans réduction du colorant)

Mélange d'attapulгите et d'indigo en poudre en faisant varier le pourcentage d'indigo de 50 à 0.5 %, la température (150 ou 190 °C), et le temps de cuisson ( 5 ou 20 h).

#### Recette n°3<sup>14</sup>

3 à 5 g de feuilles fraîches ou sèches + 1 à 1.5 g d'argiles (palygorskites + hectorite, illite, bentonite, kaolinite) pour 100 ml d'eau. Remuer régulièrement pendant 24 heures pour les feuilles fraîches et 15 à 18 heures pour les feuilles sèches (**fermentation**). Lorsque qu'une mousse jaunâtre apparaît il faut agiter afin d'oxygéner le mélange en le déversant successivement dans plusieurs récipients (**oxygénation**) pendant une dizaine de minutes. Filtrer le sédiment vert-bleu formé ; le filtrat a une couleur marron-jaune. Sécher à l'étuve sans dépasser les 100°C durant 60 à 90 minutes. La couleur bleu apparaît au bout de vingt minutes. On peut éventuellement rajouter de l'alun avant l'oxygénation (100mg / 100ml eau) pour faire varier la couleur.

---

<sup>12</sup> R.KLEBER., L.MASSCHELEIN-KLEINER., J.THISSEN., Etude et identification du bleu maya, *Studies in Conservation*, vol 12, pp 41-56, 1967.

<sup>13</sup> R.KLEBER., L.MASSCHELEIN-KLEINER., J.THISSEN., op.cit

<sup>14</sup> REYES-VALERIO, C., *op. cit.*

#### Recette n°4<sup>15</sup>

Mélanger 29 % de sépiolite, 57 % d'attapulgite, 14 % d'indigo en poudre avec de l'eau distillée afin d'obtenir une pâte. Laisser se reposer le mélange pendant 12 heures. Enlever l'eau excédentaire et sécher le résidu sur papier filtre. Mettre à l'étuve pendant 80 minutes à 70°C.

Les recettes sont classées chronologiquement. Certaines se ressemblent et d'après leurs auteurs toutes donnent des résultats satisfaisants de résistance. Ces recettes n'ont pas été vérifiées par nos soins, mais nous pouvons déjà faire les commentaires suivants :

la dernière recette met en jeu un mélange d'indigo solide et d'argile avec un domaine de températures et de temps voisins à celui de la recette n°3. Or il s'avère que les résultats des tests de résistance sont négatifs. Avec ces méthodes, il nous a été impossible de synthétiser un pigment résistant. Seule la recette n°2 fut satisfaisante au niveau de la résistance du bleu maya obtenu.

Il est facile de comprendre pourquoi les recettes n°4 et n°3 ne fonctionnent pas. La résistance du pigment est uniquement due au chauffage. Que pouvons nous dire des autres paramètres comme le pourcentage d'indigo ou le temps ? Il semble qu'une augmentation du temps de cuisson de 1 à 5 heures améliore la résistance du pigment.

La recette n°3 propose une méthode qui se base sur l'utilisation des feuilles d'indigotier et donc directement du colorant, sans passer par l'indigo solide. Ce procédé est particulièrement intéressant puisqu'il se rapproche de la pratique traditionnelle. Il refléterait mieux les techniques et la manière de penser des peintres mayas qui utilisaient symboliquement l'eau, la « terre » (chaux ou argile dans ce cas) et le feu pour la transformation des matériaux. L'absorption de l'indigo par l'argile et la formation du sédiment est un procédé relativement facile à mettre en œuvre alors que l'extraction des pains d'indigo à partir des feuilles d'indigotier met en œuvre des étapes nombreuses et compliquées. De plus, la quantité de feuilles nécessaire pour obtenir quelques grammes d'indigo est considérable. Ces remarques ne feront qu'effleurer le problème car il est impossible d'affirmer quoi que ce soit.

Nous pensons qu'il a pu exister deux types de fabrications, l'une par voie humide, avec utilisation d'une décoction de feuilles, et l'autre par voie sèche avec utilisation d'indigo solide.

---

<sup>15</sup> M. D. GRIMALDI, Painting techniques and deterioration due to air pollution of the wall paintings of the aztecs at the great temple of Tenochtitlan in Mexico city, *Thesis of Master in Art Conservation*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2000.

## 2 – Fabrication du bleu maya par la voie humide

Le procédé que nous avons choisi est très simple, et ne nécessite pas de monter une cuve d'indigo relativement compliquée à faire. Cette manière d'opérer est calquée en partie sur les méthodes de teinture dites « primitives » utilisant des feuilles fraîches. Elle n'utilise pas le processus de fermentation des feuilles pour libérer l'indoxyle et former l'indigo. On se servait pour cette teinture, non pas de chaudron allant au feu, mais de cuves de bois, de jarres de terre, ou de fosses enterrées, où le liquide n'a pas besoin de dépasser 50°C. Les expériences de préparation du bleu maya par voie humide ont été réalisées avec du pastel (*Isatis tinctoria*) et de l'attapulgite (*Société Expansia*).



1



2



3



4

- 1 - Les feuilles fraîches sont déposées dans un récipient.
- 2 - De l'eau bouillante est ajoutée aux feuilles.
- 3 - Les feuilles macèrent, du point de vue chimique se réalise ainsi l'hydrolyse enzymatique de l'indican et la production de l'indoxyle.
- 4 - La solution se colore légèrement, le liquide entre en fermentation. On contrôle la production de l'indoxyle en ajoutant un composé basique comme la lessive de soude.

En réalité dans la méthode de teinture, l'ajout de la base (souvent lessive de cendres (KOH) ou chaux) sert à maintenir un taux alcalinité suffisant pour neutraliser l'acide lactique formé lors de la fermentation par la dégradation des sucres de la matière végétale. Les bacilles lactiques présents sur les feuilles forment l'acide lactique qui nuit à la conservation du liquide et à ses propriétés tinctoriales. L'ajout de composé basique au liquide sert seulement à vérifier que l'indoxyle est bien formé.



5



6



7



8

5 : réaction du liquide ou jus de plante avec la lessive de soude après agitation (oxygénation) : l'indigo précipite, le bain est prêt.

6 : filtrage de la solution pour éliminer les feuilles.

7 : ajout d'attapulgite dans le jus de plante.

8 : Oxygénation du liquide contenant l'argile par transvasement.



9



10

9 : décantation.

10 : dépôt du sédiment bleu au fond du récipient, la couleur apparaît peu à peu.

Fig. 39 : Préparation du bleu maya par la voie humide – obtention du sédiment bleu prêt à cuire

En quelques minutes, et très facilement, un sédiment d'un bleu intense est obtenu, prêt à cuire pour donner du bleu maya. La couleur du bleu maya obtenu par cette méthode est très lumineuse et saturée. On peut noter que le procédé par voie humide est soumis au calendrier botanique de la plante. La période de cueillette ne dure qu'un mois. Les feuilles ne se conservent pas, la seule manière d'avoir de l'indigo toute l'année est de faire fermenter et sécher les feuilles puis de les conditionner ; ou bien d'extraire la fécule qui elle se conserve très bien sous forme de pains. Ce qui nous conduit à étudier le procédé utilisant les pains d'indigo.

### 3 – Fabrication du bleu maya par la voie sèche

Le procédé par voie sèche consiste à mélanger l'indigo avec l'argile. Ce mélange peut se faire à sec à l'aide d'une spatule ou dans un mortier en phase pâteuse en ajoutant un peu d'eau. Cette dernière opération améliore l'absorption de l'indigo dans l'argile. La pâte est mise à sécher, puis elle est broyée et mise à cuire.



*Le mélange de l'argile de Sacalum et de l'indigo du Mexique broyé et obtention d'une pâte après broyage et malaxage au pilon et à la spatule .*

Fig. 40 : Préparation du bleu maya par la voie sèche – obtention de la pâte bleue prête à cuire

Dans les deux procédés par voie humide ou sèche, l'argile entre en contact avec une multitude de molécules différentes en provenance des végétaux utilisés. Jouent-elles un rôle dans la réaction des principes colorants avec l'argile ?

Afin d'apporter des éléments de réponse, nous avons conçu l'expérience suivante : elle consiste à mettre en présence l'attapulгите et de la vapeur d'indigotine synthétique pure. La voie sèche par excellence. L'opération se déroule à 200° C et dure une heure. Au bout de ce temps, une partie de l'attapulгите a pris la teinte bleu vert du bleu maya. Il y a donc bien réaction directe de l'indigotine avec l'attapulгите, sans intervention d'autres molécules.

Nous avons remarqué que lors de la vaporisation de l'indigo du Mexique, une fumée rouge violacé apparaît , et qu'un résidu se forme : ce sont de petites aiguilles brun violet, brillantes, à reflet métallique mordoré. Indirubine ?, L'indigo se vaporise sous forme d'indirubine ? Le contact entre l'attapulgite et l'indigo lors du chauffage se fait également sous forme indirubine ?

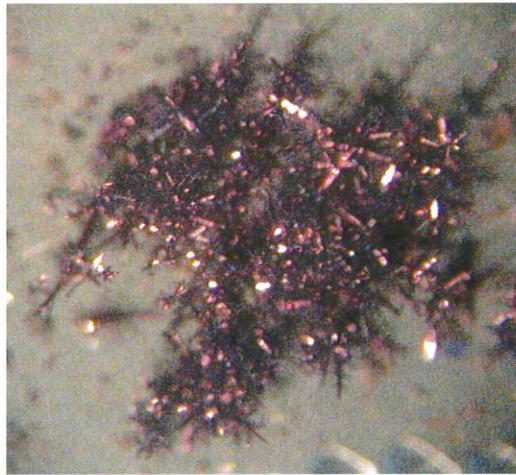


Fig. 41 : Résidu de vaporisation de l'indigo





## 4 – Voie sèche ou humide : la cuisson

La première observation que nous ferons, c'est que la couleur apparaît progressivement et va en s'assombrissant comme on peut le voir sur la série de photos suivantes, photos d'un verre de montre posé sur une plaque chauffante régulée à 181 °C :

**A** – Après 1 minute de cuisson, la couleur bleu-vert apparaît au centre, là où la température est la plus élevée.

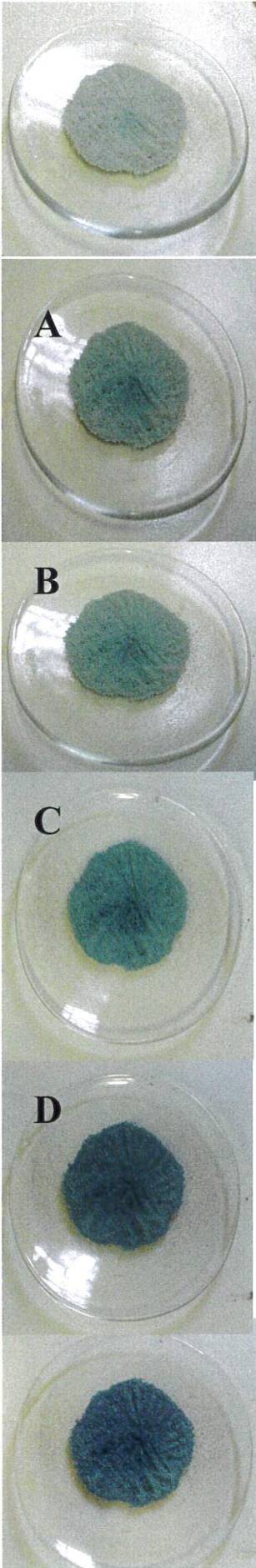
**B** – 2 minutes de cuisson. La couleur bleu-vert s'étend du centre vers l'extérieur

**C** – 3 minutes. La couleur du centre évolue vers le bleu.

**D** – 5 minutes. La tonalité verte a partout disparu. Le centre est d'un bleu plus intense.

Puis, pour 6 minutes, il y a apparition en surface de «grains» bleu foncé qui soudain mouillent la surface de l'argile environnante et la bleuissent.

Ce phénomène est caractéristique de la fabrication du bleu maya. A température donnée, l'apparition de cette diffusion en surface intervient toujours au même moment, et donc, à la même température. Une augmentation de la température de la plaque chauffante raccourcit le temps à partir duquel se produit le phénomène.



La saturation de la couleur bleue augmente.

En résumé, avec la voie humide, on cuit une poudre déjà bleue. La cuisson modifie la couleur qui devient plus saturée. La poudre n'étant plus en contact avec la décoction riche en colorants, quelle est la cause de cette évolution de la couleur ? Trois hypothèses s'offrent à nous :

- l'indigotine adsorbée à la surface de l'argile rentre dans les canaux, remplaçant progressivement l'eau zéolitique. Hypothèse couramment admise pour la voie sèche.
- l'indirubine adsorbée contribue au phénomène. Soit en se transformant en indigotine, soit en pénétrant dans les canaux dilatés par l'élévation de température.
- l'indigotine se lie au fer présent dans la structure de l'argile, ce qui modifie son spectre d'absorption de la lumière dans le visible. Hypothèse conforme aux vues de Polette<sup>16</sup>.

Par la voie sèche, on cuit un mélange peu coloré de poudres, attapulгите additionnée d'un peu d'indigo. La couleur se développe complètement durant la cuisson.

Il est intéressant de remarquer que l'on peut distinguer les bleus mayas obtenus par les deux voies. En effet, leur observation au microscope optique montre que si les échantillons obtenus par voie sèche présentent toujours des petits grains d'indigo excédentaires, qui d'ailleurs sont de couleur violacée comme l'indirubine, il n'en va pas de même pour ceux issus de la voie humide, qui n'en contiennent pas. De plus le nombre de grains d'argile non « teints » des échantillons obtenus par voie sèche est supérieur à ceux de ceux issus de la voie humide.

Ces faits peuvent servir de critère pour distinguer les méthodes de préparation. Disons tout de suite que la vingtaine d'échantillons archéologiques que nous avons étudiés ne présentent ni grains d'indigo, ni grains blancs d'argile.

---

<sup>16</sup> POLETTE, op. cit.

Peut-on doser la quantité d'indigo que représentent ces petits grains ?

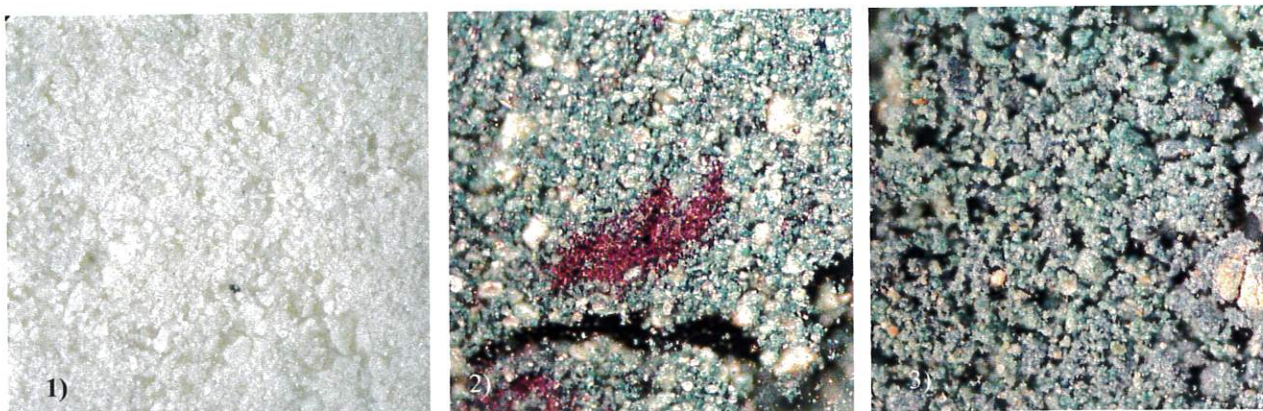


Fig.42 : vue au microscope optique (x40) 1) d'attapulgite, 2) de bleu maya fabriqué selon la voie sèche et 3) selon la voie humide

## 5 – Voie sèche : détermination de la quantité d'indigo non fixée

Quel rapport y a-t-il entre la quantité d'indigo utilisée pour la fabrication du bleu maya (5 et 10% dans nos expériences) par la voie sèche, et la quantité réellement fixée sur l'argile ?

Nous avons confié un bleu maya synthétisé par la voie sèche (attapulgite pure et indigotine synthétique, 10%, 5 h à 190°C) à un laboratoire de L'Oréal<sup>17</sup>. Celui-ci l'a traité par la diméthyl formamide (DMF), solvant dans lequel l'indigotine est le plus soluble, puis a dosé l'indigotine contenue dans l'extrait par spectrophotométrie dans le visible. Résultat : après deux extractions, 50% de l'indigotine contenue dans ce bleu maya a été extraite. A la troisième extraction la solution est pratiquement incolore et le résidu solide est bleu-vert clair.

On peut donc penser qu'il suffirait de mettre 5% d'indigotine. En fait, on observe aussi dans ce cas la présence de grains bleus, qui se dissolvent par lavage à la DMF.

<sup>17</sup> Analyses faites par le département de Chimie Analytique, Recherche Avancée – Sciences de la matière, L'Oréal, Aulnay sous Bois.

## 6 – Influence du broyage sur la couleur :

Le broyage des bleus mayas obtenus par la voie sèche donne des résultats surprenants : la saturation de la couleur augmente.

On sait qu'en général, c'est le contraire qui se produit, l'augmentation du rapport surface / volume du matériau en cours de broyage provoquant la croissance du rapport lumière diffusée / lumière absorbée, et donc la désaturation de la couleur.

Doit-on en conclure que cet effet est compensé par un mélange plus intime du bleu maya avec les grains d'indigo non fixés ? Auquel cas le phénomène serait propre à la voie sèche. Ou bien brise-t-on plus finement la structure de l'argile, et rapproche-t-on de la surface les molécules d'indigotine piégées dans les canaux ? Auquel cas, le phénomène serait commun aux deux voies.

On observe un blanchiment par broyage d'un échantillon fabriqué par voie humide. Ce phénomène n'est pas commun au deux voies. Ce sont les grains d'indigo non fixés qui broyés augmentent la saturation de la couleur.

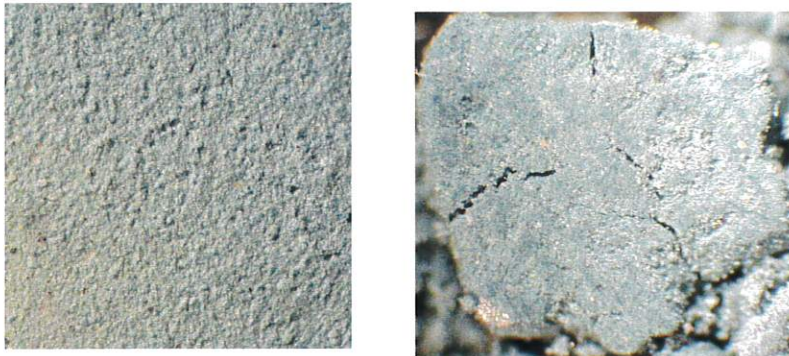


Fig.43 : vue au microscope optique (x40) de bleu maya fabriqué selon la voie humide broyé (à gauche) et non broyé (à droite)



# 3

## Variation sur le thème des tonalités : vers un nuancier de bleus mayas

Divers paramètres influent sur la couleur du bleu maya obtenu : pourcentage d'indigo, nature de l'argile, température et temps de cuisson.

Notre voyage dans l'aire maya (mars 2003), nous a permis de nous rendre compte que la palette chromatique des bleu – vert est riche. Dans ses "*Materiales y técnicas de la pintura mural maya*", Magaloni décrit six tonalités distinctes de bleus et autant de verts, c'est-à-dire douze couleurs "yax" employées pour des usages bien précis.

Comment les artistes mayas ont-ils réussi à les obtenir ? A notre connaissance, personne ne s'est intéressé à cela. Comme nous l'avons déjà dit, la littérature parle DU bleu maya et non DES bleus mayas.

### 1 - Réalisation d'un nuancier bleu

Afin de nous rapprocher des matériaux utilisés par les Mayas, nous avons abandonné l'attapulgite française de Mormoiron pour des *tierra blanca* locales que nous avons prélevées nous-mêmes dans des *cenotes* sacrées de Sacalum et de Ticul (Yucatán). Celle de Sacalum a été identifiée par Arnold<sup>18</sup> comme une attapulgite. L'analyse élémentaire par PIXE<sup>19</sup> montre qu'elle contient un peu de fer, ce qui expliquerait sa couleur orangé. L'argile de Ticul, très blanche, est de nature inconnue ; elle se comporte différemment qu'une attapulgite. Par exemple, elle absorbe beaucoup plus l'eau. Peut-être est-ce une smectite. Nous présenterons ici les résultats obtenus avec l'attapulgite de Sacalum.

Dans le même souci, nous avons retenu l'*indigofera suffruticosa* Miller comme source d'indigo. Notre présence dans le Yucatán ne correspondant pas à l'époque où l'on peut récolter les feuilles de cette plante, nous avons été obligé d'employer de l'indigo en pain, et donc de fabriquer nos bleus mayas par la voie sèche.

Pour ce faire, un protocole d'étude a été défini afin d'étudier systématiquement l'influence de chaque paramètre sur la couleur. Nous avons fait

---

<sup>18</sup> ARNOLD, D et BOHOR, B. op. cit.

<sup>19</sup> Analyses faites à l'Instituto de Física de l'UNAM à México avec J-L Ruvalcaba.

varier le pour-cent d'indigo (de 0,2 à 3 %), la température de la cuisson (de 121 à 313°C), le temps de cuisson (de 0 à 16 minutes).

Le nuancier est donc composé de cinq séries afférentes à cinq températures de cuisson différentes et croissantes. Chaque série est composée de cinq lignes relatives aux variations du pourcentage d'indigo mélangé avec l'argile. Chacune de ces lignes comprend 16 échantillons colorés qui correspondent à des temps de cuisson croissants (minute par minute).

SERIE 1 (121°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 2 (181°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 3 (219°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	

SERIE 4 (273°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 5 (313°C)																	
Secondes	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180							
1 %																	
2 %																	
3 %																	

Tableau IX : présentation du nuancier bleu

Soit trois cent quatre-vingt-dix échantillons au total. Que nous apprennent-ils ?

Quelle que soit la série, plus le pour-cent en indigo est élevé, plus la couleur est saturée.

Tous facteurs constants par ailleurs, plus la température de cuisson est haute, plus la couleur est saturée. Pour la série 4 (273°C), on observe en plus un assombrissement de la couleur.

L'influence du temps de cuisson est plus complexe. Il semble que la couleur commence par se saturer, puis soit se désature un peu, soit verdit légèrement.

Tout ceci sera approfondi lors de l'étude colorimétrique du nuancier qui va suivre.



## 2 – Recettes et couleurs

### Obtenir des verts

On observe qu'il est possible d'obtenir un ton vert avec un pourcentage d'indigo bas, comme 0,5% et une température basse (121°C).

### Obtenir des bleus foncés

Deux possibilités s'offrent à nous pour obtenir des bleus foncés: utiliser une température élevée ou utiliser un fort pour-cent d'indigo.

### Obtenir des bleus saturés

La série 5 à 313°C permet de voir que pour obtenir une couleur saturée, il faut travailler à une température avoisinant les 300°C au minimum (réaction en phase vapeur). Dans les 60 secondes on obtient une couleur très saturée et vive. Après ce temps, la couleur s'assombrit très vite. Le temps de cuisson est donc ici très court.

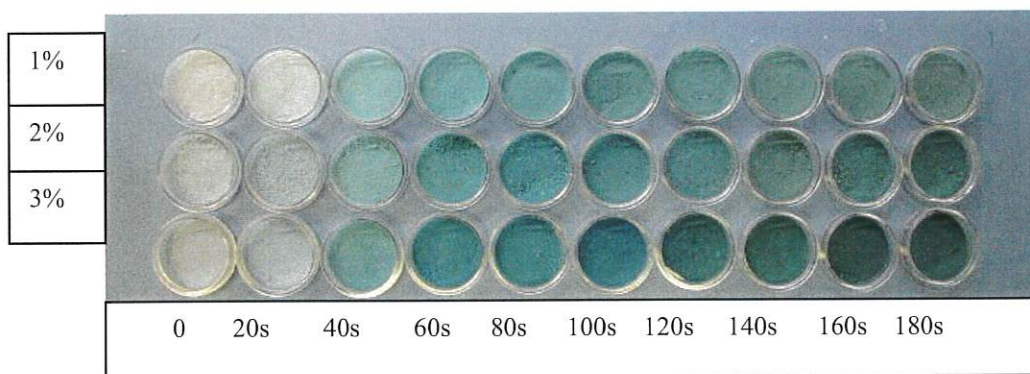


Fig. 44: La série 5, des couleurs saturées

## 3 – Influence de la nature de l'argile

Les quelques essais réalisés avec l'argile de Ticul montre que changer de source d'argile permet obtenir des gammes de couleurs différentes. Celle de Sacalum donne des bleus mayas plus verts (est-ce dû à la présence du fer ?).

Celle de Ticul donne des bleus mayas plus bleus.

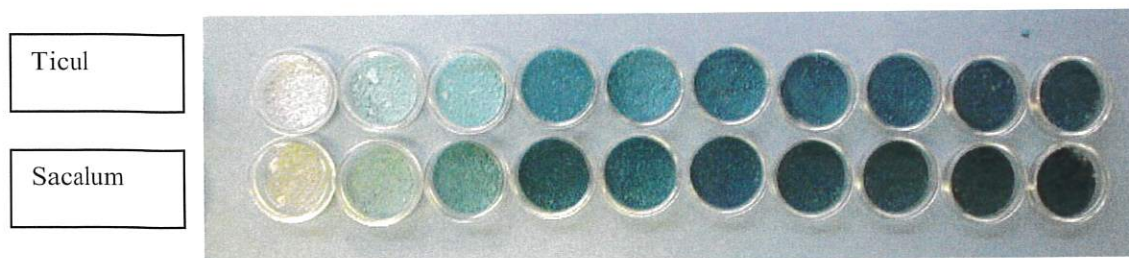


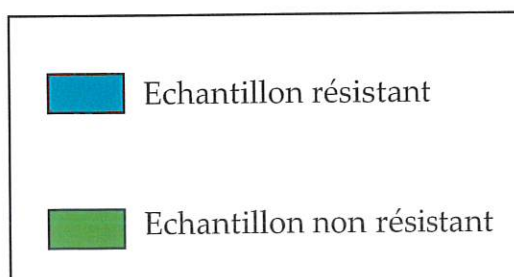
Fig. 45: Gammes de couleurs différentes en fonction de la nature de l'argile

Nous avons remarqué que la gamme colorée du postclassique est beaucoup plus bleue que celle du classique. La nature de l'argile utilisée pour la fabrication des bleus est peut-être la cause de la différence de teinte entre deux époques.

Ces expériences de reconstitutions font apparaître une donnée importante jamais relatée par aucune autre étude : il n'est pas nécessaire de chauffer pendant des heures comme relaté dans la littérature le mélange indigo – attapulгите pour obtenir un bleu maya stable. Quelques minutes suffisent. C'est ce que montrent les essais de résistance à l'acide nitrique bouillant réalisés.

SERIE 1 (121°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 %		■						■	■	■							■
SERIE 2 (181°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 %		■	■					■									■
SERIE 3 (219°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 %		■															■
SERIE 4 (273°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 %		■	■														■
SERIE 5 (313°C)																	
Secondes	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180							
1 %				■				■		■							

SERIE 4 (273°C)			
Minutes	1	3	16
0.2 %	■	■	■
0.5 %		■	■
1 %	■	■	■
2 %		■	■
3 %	■	■	■









<b>SERIE 5 (313°C)</b>		
<b>Secondes</b>	<b>40</b>	<b>160</b>
1 %		
2 %		
3 %		

Tableau X: Tests de résistance à l'acide nitrique bouillant

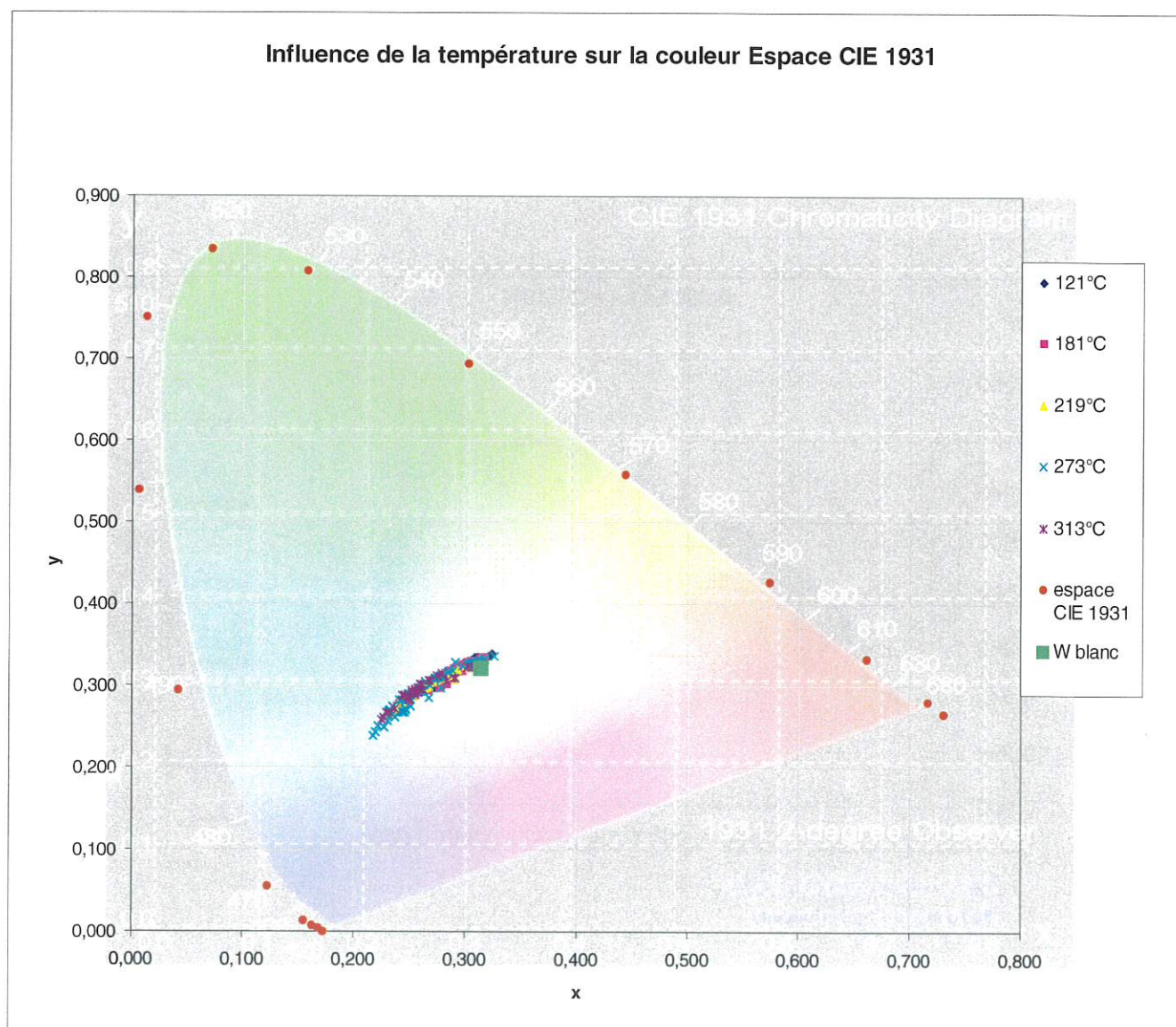
Il est bien entendu que ce critère est ici utilisé pour se comparer aux études déjà publiées. En aucun cas il n'aurait pu intéresser les artistes mayas qui utilisaient non seulement des attapulgites, mais aussi des argiles à feuillets.

## 4 – Etude colorimétrique du nuancier

L'objectif de cette étude est : premièrement quantifier le phénomène coloré ; deuxièmement mettre en évidence l'influence des paramètres physiques. Ces paramètres physiques sont au nombre de trois : température de cuisson, durée de cuisson, teneur initiale en indigo.

Les poudres colorées qui forment le nuancier ont été mesurées, conditionnées dans leurs boîtes de présentation. Ces boîtes en plastique transparent présentent l'avantage de manipuler et de mesurer facilement ces poudres. Le contact direct avec la poudre n'est pas possible sous peine d'endommager l'appareil. L'inconvénient de cette méthode, c'est qu'il y a une légère déperdition de la lumière et un très léger décalage des valeurs puisque le plastique est un peu bleu. Cela est toutefois insignifiant et n'empêche pas l'interprétation des résultats.

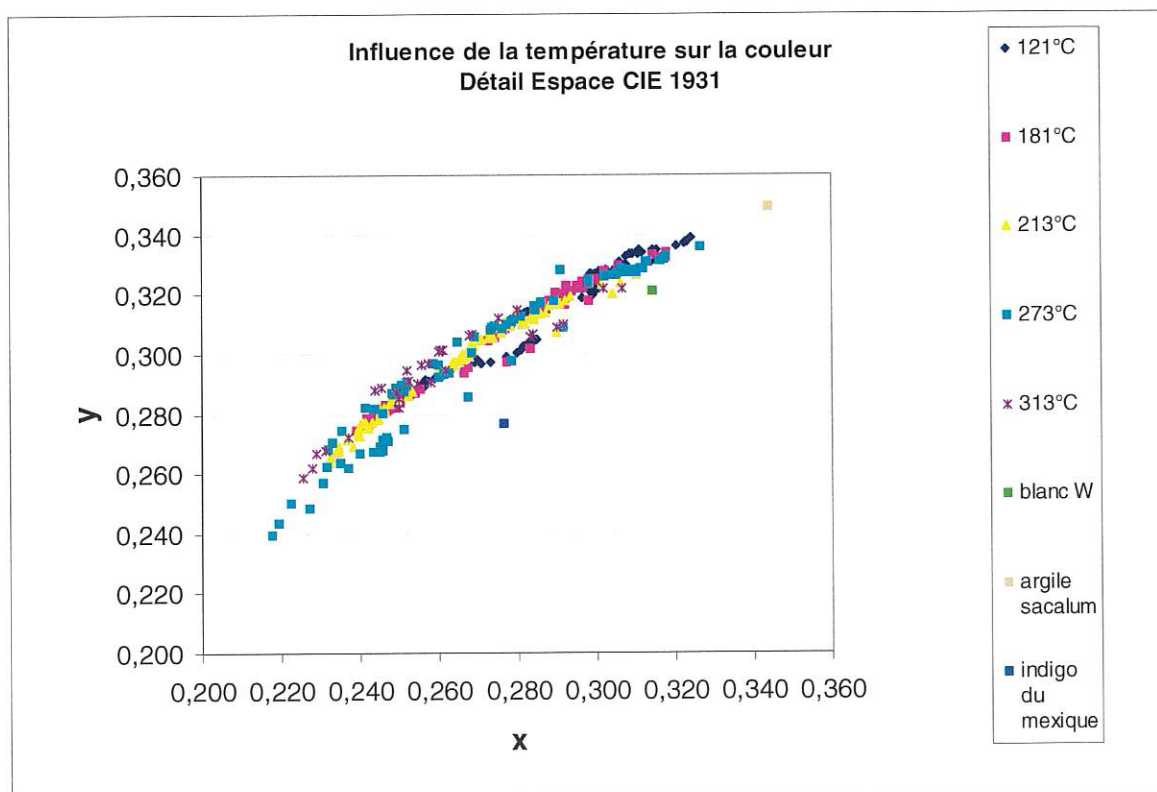
Les représentations des couleurs dans un espace colorimétrique sont multiples et peu commodes à exploiter. On va donc changer le système à notre convenance (Yxy ; Lab, LCh).

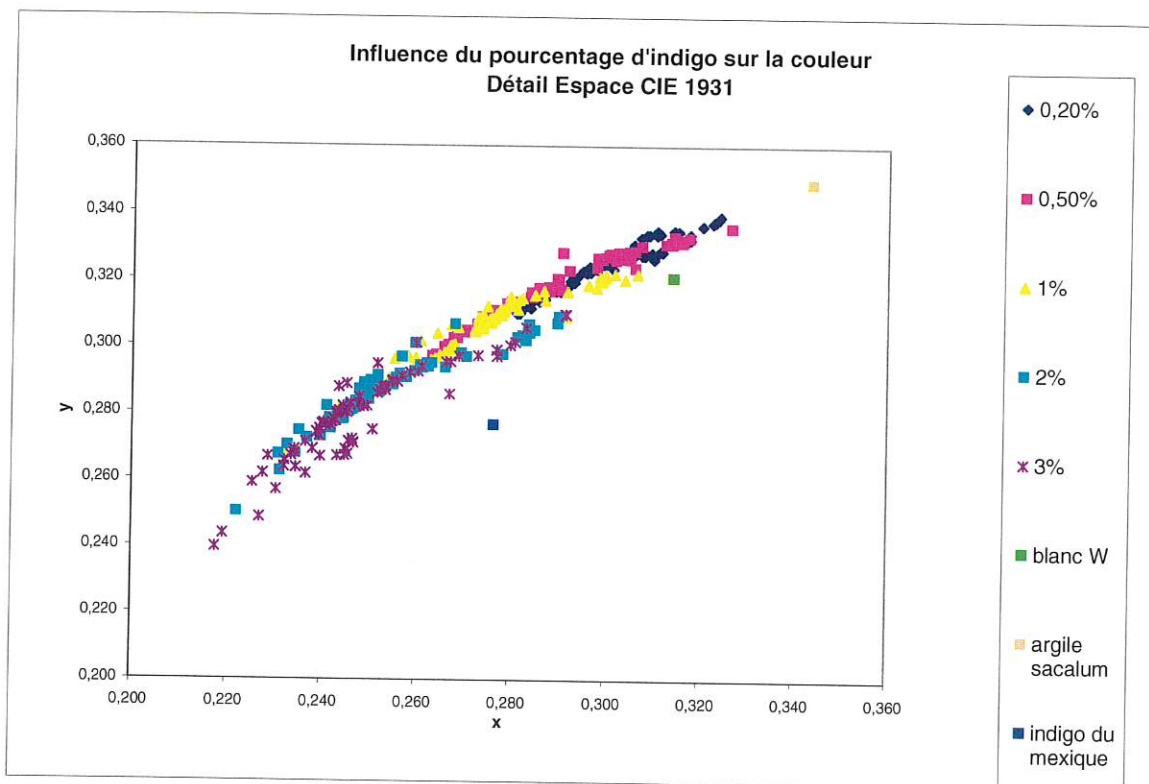


## 1) Résultats globaux

L'observation des diagrammes permet de mettre en évidence les cinq points suivants :

- Chaque série se place sur une courbe géodésique dont l'origine serait l'argile de sacalum.
- Elles se superposent toutes plus ou moins, bien qu'il y est toujours un écart.
- Ces séries se décalent vers la saturation maximum quand la température croît.
- Ces séries se décalent vers la saturation maximum quand le pourcentage en indigo croît.
- Normalement quand on mélange sacalum et indigo, les points du mélange, c'est à dire les bleus mayas, se trouvent entre les points correspondants aux composés de départ. C'est une propriété de cet espace colorimétrique, or bizarrement ici, ça n'est pas le cas. L'indigo pur a une teinte différente de celles des bleus mayas du nuancier.





Il faut dire que lorsque l'on obtient des couleurs dont les points représentatifs sont sur la géodésique qui relie les deux pigments purs, cela sous entend qu'il n'y a pas réaction chimique. Le fait qu'avec les bleus mayas on ait un déplacement de la longueur d'onde traduit les liaisons chimiques entre molécule d'indigotine et d'argile, c'est-à-dire que les niveaux électroniques changent. Par conséquent la couleur change aussi.

L'observation du diagramme ci dessus permet de mettre en évidence un point : à partir des 2 et 3 pour-cent la droite dévie un peu vers le bas, on change un peu de teinte.

## 2) Résultats détaillés : au sujet de la saturation de la couleur

Essayons de cerner plus finement les phénomènes qui occurred. On va suivre l'évolution de la couleur au cours du temps.

Bien que dans la littérature on trouve des temps de cuisson allant de une à cinq heures, nous avons choisir de réaliser la cuisson durant un temps plus court (16 minutes) car nos premières expériences montraient que cette durée était suffisante. On se place dans le système LCh car il utilise la saturation de la couleur, *chroma*.

### a) Influence de la température

Cf. figures de gauche : *COURBES CINÉTIQUES DE L'ÉVOLUTION DE LA SATURATION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE*

On voit qu'il existe un seuil de température entre 121 et 181°C, à partir duquel la synthèse du bleu maya se fait.

- A 121°C, le diagramme est assez peu compréhensible et difficile à interpréter hormis le fait que la saturation augmente un peu.
- A 181°C, la saturation maximale de la couleur est atteinte en 120 secondes. Il semble que le nombre de centres colorés augmente, donc le nombre de molécules d'indigo qui se trouve en surface ou dans les canaux. À partir de 120 secondes, on a un palier, la saturation ne varie plus. Ce type de courbe est l'exemple du phénomène « parfait » qui marche bien.
- À des températures supérieures à 181°C la saturation décroît. On revient en arrière : on perd des centres colorés. Tout se passe comme si il y avait évaporation de l'indigo. Peut-être est-ce l'indigo de surface qui s'en va, reste celui qui est dans les canaux.

On remarque que plus la température augmente plus le phénomène va en s'accroissant.

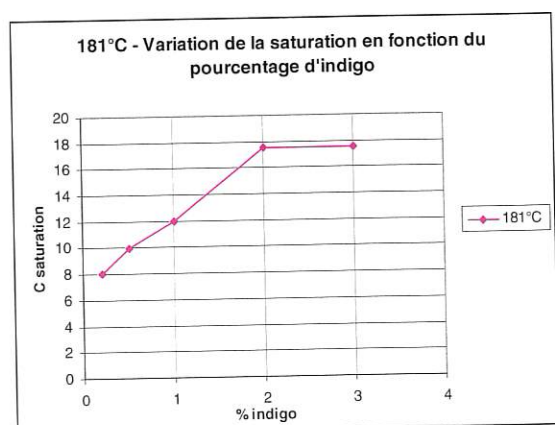
### b) influence du pourcentage d'indigo

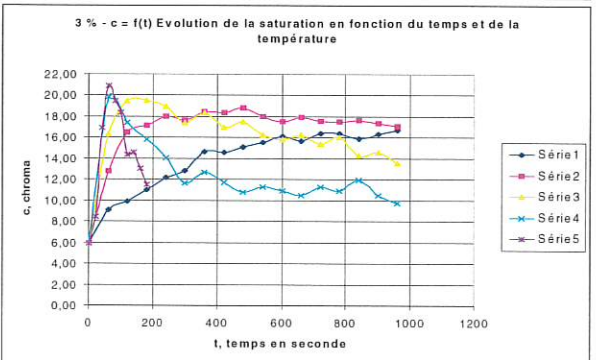
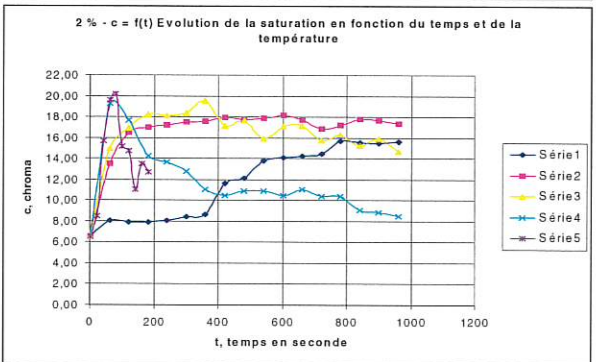
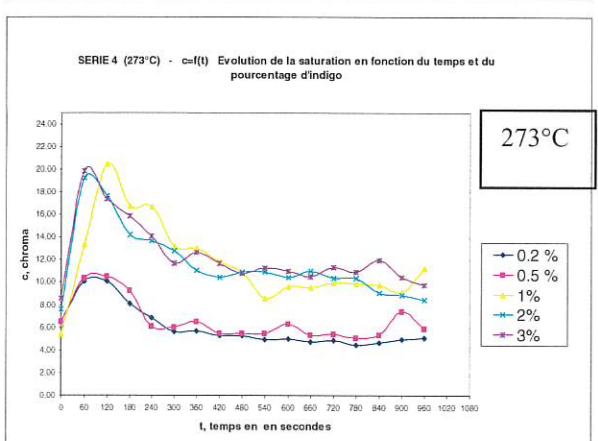
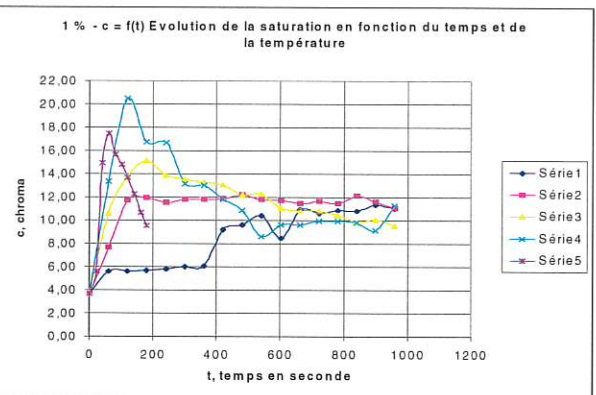
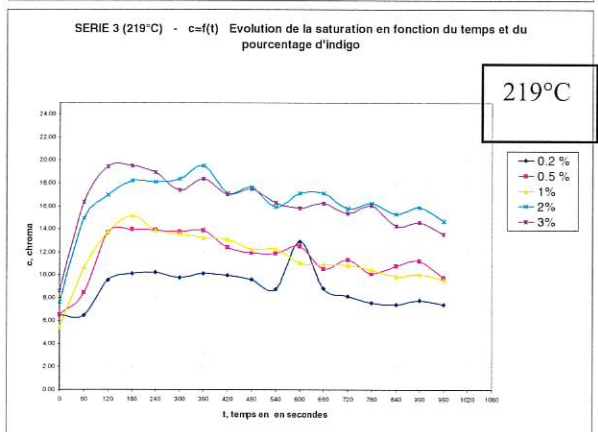
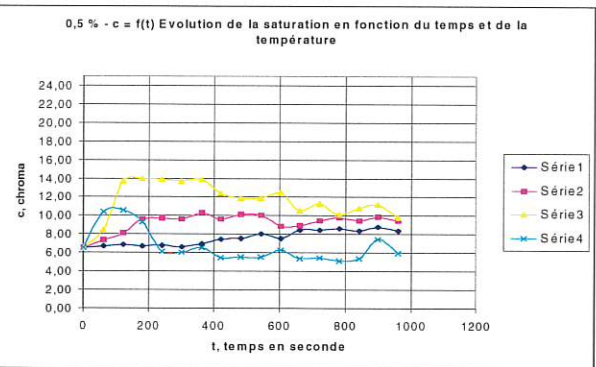
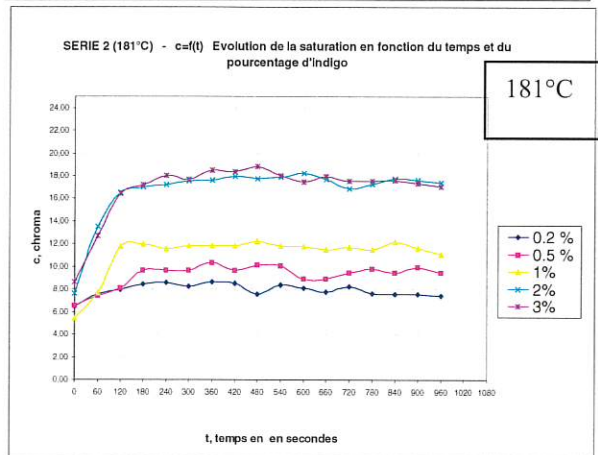
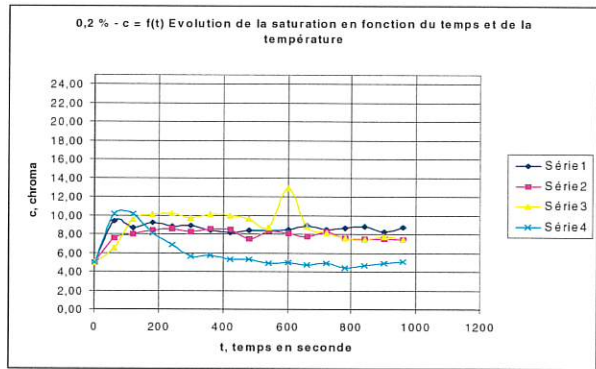
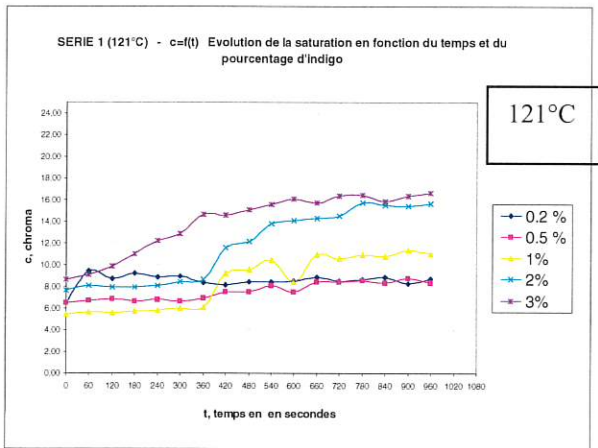
Cf. figures de droite : *COURBES CINÉTIQUES DE L'ÉVOLUTION DE LA SATURATION EN FONCTION DU POURCENTAGE D'INDIGO*

La saturation est proportionnelle au pourcentage d'indigo.

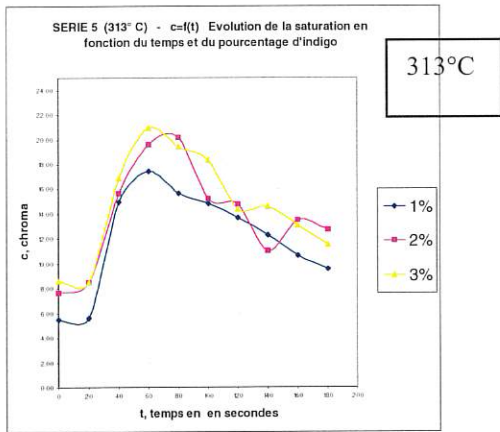
- Jusqu'à 2 %, la saturation est proportionnelle à la teneur en indigo initiale ; une fois atteinte, la saturation maximale reste constante (palier) (cf. fig. ci-dessous : *variation de la saturation en fonction du pourcentage d'indigo*). Mais pour des pourcentages supérieurs ou égaux à 2 %, un autre phénomène se greffe : celui de la désorption qui provoque la désaturation de la couleur.

Un pourcentage d'indigo de l'ordre de 2% correspond au pourcentage maximal d'absorption de l'argile (on obtient un palier à partir de 2%, cf. graphique ci-contre).





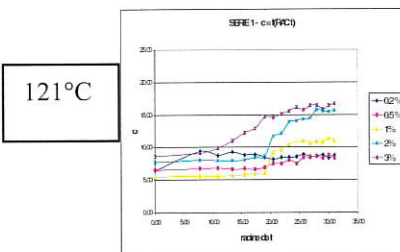




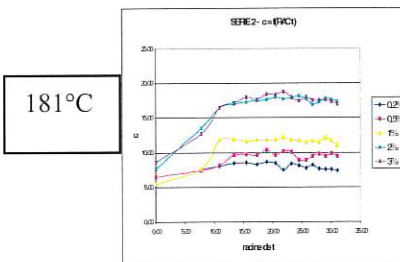
### 3) Mise en évidence d'une diffusion

En supposant que la saturation de la couleur soit liée de manière simple à la concentration en molécules d'indigotine présentes « dans » l'argile, pourrait-on aller plus loin et mettre en évidence, par exemple, la diffusion de l'indigotine sur ou dans l'argile ?

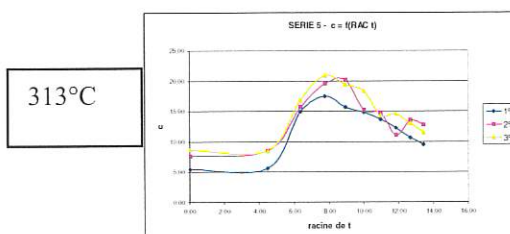
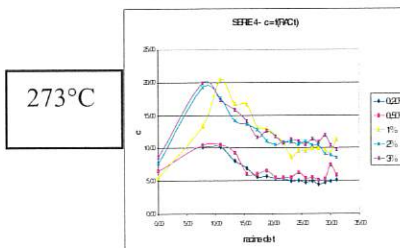
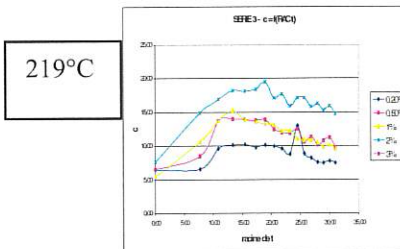
Les distances parcourues par les molécules seraient proportionnelles à la racine carrée de la durée (loi de Fick). Est ce le cas ?



La première réflexion est que l'on a que trois points dans la période évolutive de la droite qui nous intéresse. C'est trop peu.



Les trois points sont en ligne droite : on pourrait avoir un phénomène de diffusion pendant les 120 premières secondes. Il faut poursuivre l'expérimentation en choisissant des intervalles de temps beaucoup plus courts.

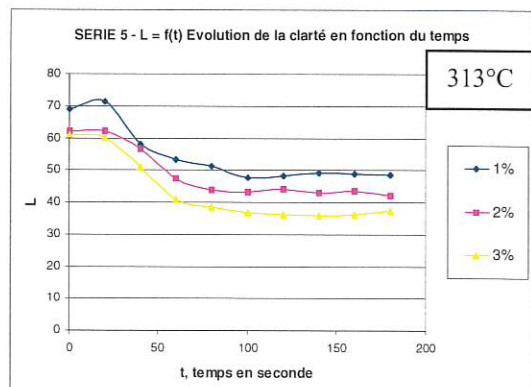
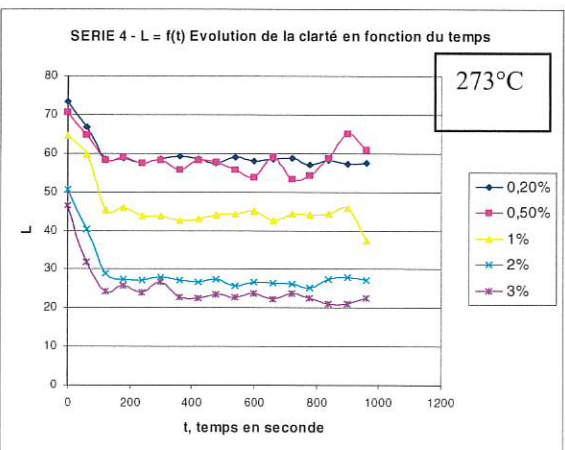
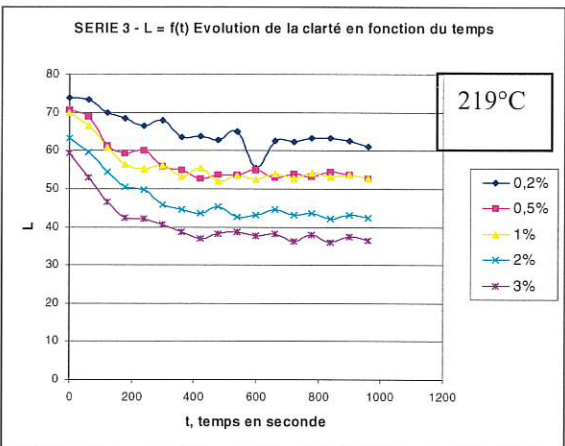
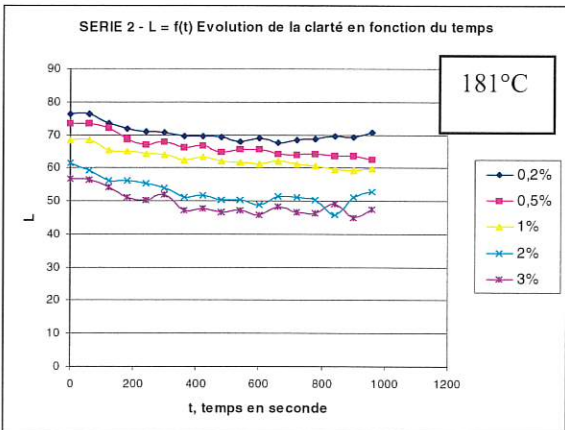
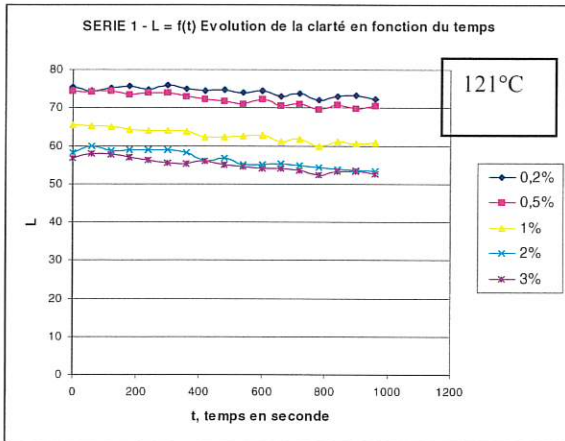


#### 4) Au sujet de la clarté

L'échelle des clartés va de 0 à 100 %, du noir au blanc.

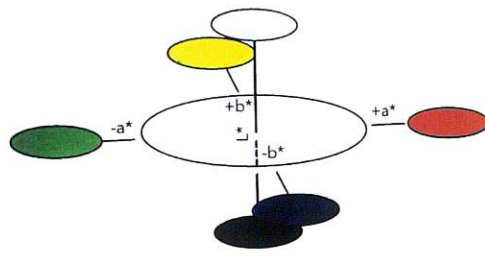
Au vu, des courbes cinétiques de l'évolution de la clarté pour chaque série, deux ponis sont à souligner :

- La clarté diminue lorsque la température augmente. L'argile se colore, le pigment renvoie moins de lumière.
- A 121 et 181°C, elle diminue très peu.
- Pour des températures supérieures, la diminution de la clarté est importante
- Ce phénomène s'accroît encore plus si le pour-cent en indigo est élevé, c'est-à-dire pour les échantillons à 2 et 3%. Ceux-ci absorbent beaucoup de lumière par rapport aux autres.



5) Au sujet de la teinte et des tonalités

On se place dans le système Lab car il est plus facile de visualiser les différences de couleurs.



a) influence de la durée de cuisson

- Lorsque la durée de cuisson croît la couleur tend vers le vert (a diminue) et légèrement vers le bleu (b diminue). Au moment où la couleur apparaît, il y a des "sauts" de points.

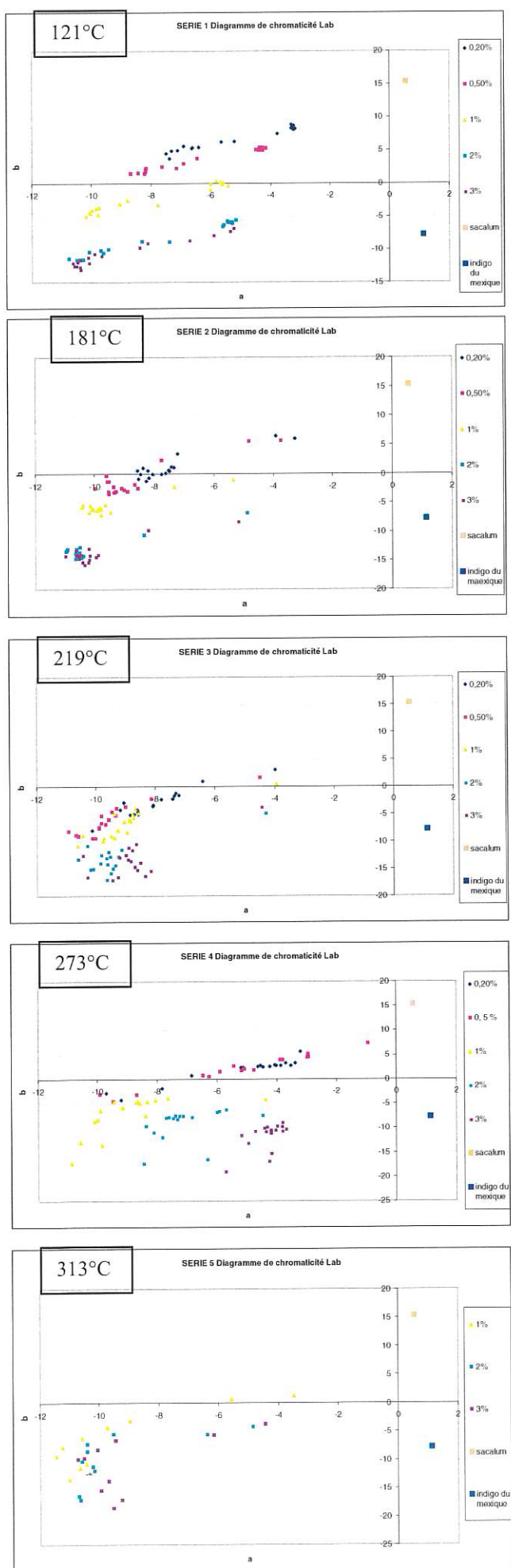
b) influence du pourcentage d'indigo

- La couleur tend vers le bleu lorsque le pourcentage d'indigo croît.
- 0,2 et 0,5 % en indigo donne des couleurs situées dans la zone des vert-jaune pour des températures inférieures à 200°C (121 et 181°C).
- les points afférents aux séries 2 et 3 % sont toujours situés dans la zone des bleu-vert.

c) influence de la température de cuisson

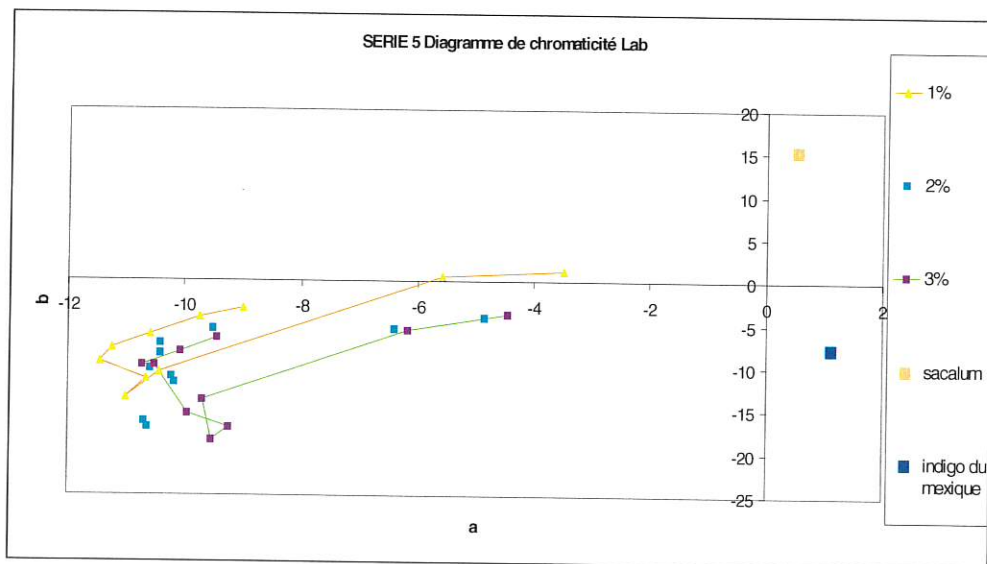
- Lorsque la température augmente la couleur tend vers le bleu. A 121°C on est à cheval sur les zones vert-jaune et vert-bleu. A 181°C on est dans la zone des bleu-vert.

Les "sauts" de points sont d'autant plus grands que la température augmente, et



l'apparition de la couleur est d'autant plus rapide.

- A 121 et 181°C, la couleur se stabilise (agroupement de points).
- Au delà de cette température la couleur change un peu (plus rouge et plus jaune, cf. graphique suivant). C'est le phénomène de désorption déjà évoqué qui est visible ici. Il est surtout significatif pour les pourcentages de 2 et 3 %. Ceci confirme nos observations précédentes.



Evolution de la couleur en fonction du temps dans la série 5

## 6) Conclusions

En résumé, la réalisation du nuancier et son étude colorimétrique nous a permis de définir que pour la synthèse du bleu maya, il y a :

- un seuil de température pour laquelle la saturation et la tonalité sont stables : 181°C
- un seuil de durée de cuisson pour lequel on obtient la saturation maximale du pigment : 120 seconde.
- un seuil du pourcentage d'indigo fixé maximal : 2 %

Les couleurs mayas sont vives et saturées, alors comment parvenaient-ils à obtenir ces tonalités spécifiques?

Sans doute cuisaient-ils le bleu maya à une température proche de 180°C pour avoir une couleur de base dont les tonalités pouvaient être déclinées en faisant varier la quantité d'indigo. Mais pour les couleurs les plus vives ? Peut-être cuisaient-ils le pigment à plus haute température pendant un temps très court en veillant à ce qu'il n'y ait pas de désaturation de la couleur. Curieusement on se rend compte qu'il est possible de fabriquer un vert à partir du bleu maya, ou plutôt du mélange d'argile et

d'indigo. Il suffit de travailler à basse température avec des pourcentages d'indigo faibles (0,2 ; 0,5 %).

Calakmul, Campêche, Mexique  
Peinture murale,  
Préclassique terminal,  
Colorimètre Minolta C200  
© Photo Sonia Ovarlez

---

# Etude scientifique du bleu maya et des techniques picturales

## Deuxième partie





## **Chapitre 3**

---

# Corpus des bleus mayas étudiés et méthodes d'approches





**E**tudier les « couleurs de l'histoire », c'est essayer d'associer certains des changements paraissant les plus significatifs à une période ou à une aire culturelle déterminée. En se transformant la palette des couleurs constitue le reflet d'une évolution à la fois technique et économique et dans une certaine mesure aussi, le reflet indirect d'une évolution des goûts et des mentalités d'une époque. Afin d'observer de tels changements, il est indispensable de disposer d'abord d'un référentiel, c'est-à-dire d'un ou plusieurs ensembles de données établis à partir d'étalons de couleurs bien documentés provenant à la fois de peintures, par exemple contemporaines et originaires d'une même région, et de reconstitution expérimentales prenant en compte les résultats de leurs examens et les indications fournies par les recettes. En s'appuyant ensuite sur ces données de référence, il sera possible d'entreprendre des études comparées.



L'étude des bleus mayas et des techniques picturales mayas a été réalisée grâce aux analyses effectuées sur six types de « matériaux » différents :

- peintures murales de neuf sites de l'aire maya
- céramiques
- codex
- échantillons archéologiques de peintures murales d'une collection privée
- échantillons artificiels du nuancier
- autres échantillons artificiels et standards

### **A** Peintures murales de neuf sites de l'aire maya

Une sélection de neuf sites mayas qui possèdent des peintures murales où l'on trouve du bleu et du vert fut l'objet d'une étude colorimétrique globale *in situ*. A notre connaissance, aucune étude colorimétrique de ce type n'a été réalisée dans l'aire maya. En collaboration avec Leticia Staines, historienne de l'art maya, des sites furent choisis pour recouvrir toutes les époques et régions de la zone maya, afin d'évaluer l'évolution de l'utilisation du bleu maya au cours de l'histoire. Certaines peintures murales comme celles du site de Calakmul, présentaient l'intérêt de n'avoir jamais été étudiées puisqu'elles venaient d'être découvertes. Le but de cette étude était de :

1. Classifier les tonalités bleues et vertes et les mettre en relation avec la technique picturale utilisée<sup>1</sup>).
2. Comparer les tonalités utilisées pour des sites différents afin de définir les similitudes au sein d'une zone géographique ou d'une époque historique.
3. Essayer de mettre en relation l'utilisation de la couleur avec un langage symbolique propre de la couleur.

---

<sup>1</sup>La pintura mural prehispánica en México : Materiales y técnicas de la pintura mural maya / MAGALONI, D., Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM : III, 2001, pp 50-80

Sites	Edifices étudiés	Localisation des peintures	Epoques
Palenque CHIAPAS	Musée du site	<ul style="list-style-type: none"> <li>« Tablero de los guerreros » du temple 17</li> <li>Pilastre du temple 19</li> </ul>	Classique moyen et tardif
	Casa E	Intérieur Extérieur	
Bonampak CHIAPAS	Chambre 1	Registre 4 mur nord Registre 1 mur nord Registre 1 mur ouest Registre 2 mur ouest Registre 2 mur sud Registre 4 mur sud Registre 2 mur est Registre 4 mur est	Classique tardif
	Chambre 2	Registre 2 mur ouest Registre 2 mur sud Registre 2 mur est Registre 2 mur nord	
	Chambre 3	Registre 2 mur est Registre 3 mur est Registre 2 mur sud Registre 3 mur sud Registre 3 mur ouest Registre 2 mur nord Registre 3 mur nord	
Calakmul CHIAPAS	Structure A6	Partie restaurée Partie non intervenue	Classique ancien
Mayapan YUCATAN	Structure Q 80 ou temple « de los nichos pintados »	Entre les niches A et B Entre les niches B et C Entre les niches C et D Entre les niches D et E	Postclassique ancien
	Structure Q 161	Parois nord et nord-ouest	
	Structure Q 95 ou dit « du pêcheur »	banquette	
Chacmultun YUCATAN	Chambre 10	Mur est	Classique tardif
Chichen Itza YUCATAN	Temple de Chac mool	Serpent Pilastre EST pil 3 coté nord Pilastre OESTE pil 2 coté est	Classique tardif
	Mesas	Pilastre nord, face sud Pilastre sud, face nord	Postclassique ancien
	Temple supérieur des Jaguars	Mur ouest Mur sud	Classique terminal
	Temple inférieur des Jaguars	Bóveda (voûte) ouest Mur ouest	Classique terminal
	Las monjas chambre 22	Bóveda entre les niches 3 et 4 Mur nord	
	Las monjas chambre 17	Mur ouest	

Tulum QUINTINA ROO	Structure 5	Façade ouest coté nord Façade extérieure ouest	Postclassique tardif
	Structure 16 ou templo de los frescos	Façade nord, temple intérieur Façade est extérieur	
Xel ha QUINTINA ROO	Casa del jaguar	Casa azul Façade sud-ouest gauche, temple intérieur Mur 1, 2, 3, 4, 5	Classique terminal. Postclassique tardif
Rancho Ina QUINTINA ROO	Casa azul	Façade est	Postclassique tardif

## B Céramiques

L'étude colorimétrique de céramiques et de codex a été réalisée pour voir s'il existe des palettes différentes entre peinture murale, céramiques et codex d'une même époque.

Sites de conservation des œuvres	Type d'œuvre	Localisation	Epoques
Palenque, musée	Encensoirs de la réserve	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Élément 17 du temple 16 de la cruz foliada</li> <li>• Élément 12 du temple 16 de la cruz foliada</li> </ul>	Classique moyen et tardif
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Élément 5 temple 15</li> <li>• Élément inconnu</li> </ul>	

## C Codex

L'intérêt de l'étude colorimétrique de deux codex d'époques différentes est de définir l'évolution des techniques picturales et surtout ici de voir l'influence espagnole sur la palette de couleurs.

Sites de conservation des œuvres	Type d'œuvre	Localisation	Epoques
Bibliothèque Nationale d'Histoire et d'Anthropologie de Mexico	Codex « Colombino » 24 folios	Folios II, III, VI, VII, XVII	Préhispanique
	Codex « Azoyu I »	Recto « calendrier » Folio II, IV, V Verso « généalogie » Folios I, II, IV, VI Partie tardive Folios III, IV, V	Coloniale

## D Echantillons archéologiques de peintures murales d'une collection privée

Les échantillons qui nous ont été confiés, présentent un double intérêt : premièrement, nous étions autorisés à réaliser des études destructives sur ces prélèvements. Deuxièmement la gamme de couleurs est étendue et la provenance ou l'époque des prélèvements sont variées ; ce qui constitue un support intéressant pour une étude comparative.

L'étude des techniques de peintures murales mayas et la caractérisation des matériaux dont ils sont le support, a donc été menée grâce à l'étude stratigraphique, l'analyse spectroscopique (IRTF) et l'analyse élémentaire MEB/EDX.

N°	Nom	couleur	origine	époque
1	I1 VC	Vert clair	ICHMAC (Campeche -Mexique)	Classique terminal
2	I2 VF	Vert bleu et gris	ICHMAC (Campeche -Mexique)	Classique terminal
3	I3 VJ	Vert jaune luisant	ICHMAC (Campeche -Mexique)	Classique terminal
4	CHEVF	Vert foncé	CHELEMI (Campeche -Mexique)	Classique terminal
5	CHAVF	Vert bleu vif	CHACMULTUN (Yucatan-Mexique)	Classique terminal
6	DZBV	Bleu clair	DZIBILNOCAC (Campeche-Mexique)	Classique terminal
7	PLBV	Vert bleuâtre foncé <i>teint dans la masse</i>	PLAYA (Quintina Roo-Mexique)	Post classique
8	BT1 <sub>I</sub>	Vert bleu clair <i>Surface recouverte de paraloïd</i>	COBA I (Quintina Roo-Mexique)	Post classique terminal
9	BT1 <sub>II</sub>	Vert bleu vif	COBA II (Quintina Roo-Mexique)	Post classique terminal
10	BT1 <sub>III</sub>	Vert clair	COBA I (Quintina Roo-Mexique)	Post classique terminal
11	BT2 <sub>I</sub>	Vert bleuâtre clair <i>Surface recouverte de paraloïd</i>	COBA II ( <i>El Cuartel</i> ) (Quintina Roo-Mexique)	Classique terminal
12	BT2 <sub>II</sub>	Vert bleuâtre foncé	LA PASADITA (Guatemala)	Classique terminal

## E Echantillons artificiels du nuancier

Nous avons choisi de réaliser un nuancier de couleurs bleues afin de déterminer les paramètres qui influent sur l'obtention de la couleur (voir chapitre précédent). L'objectif de l'étude colorimétrique de ces 390 étalons de couleur est d'interpréter les variations colorées en fonction des celles des paramètres.

## F Autres échantillons artificiels et standards

Les premières reconstitutions expérimentales nous ont donné une série d'échantillons où la source botanique de l'indigo, le pourcentage, la nature de l'argile variaient. Ils nous ont permis d'établir une base de données de « standards » nécessaire à l'identification des échantillons archéologiques par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ; ou encore de réaliser des expériences de lavages pour définir la quantité d'indigo non fixée.

### Bleus mayas artificiels

Température de chauffage en degrés Celsius	Temps de cuisson en heures	Pourcentage d'indigo
120	5	5
120	5	10
190	5	5
190	5	10

### Standards d'indigo solide

Variété	Espèce botanique	Fournisseur
Indigo des Indes	<i>Indigofera tinctoria</i> Mill.	Michel Garcia, Association Couleur Garance
Indigo du Mexique	<i>Indigofera suffruticosa</i> Mill. <sup>2</sup>	
Pastel	<i>Isatis tinctoria</i> L.	
Renouée des teinturiers	<i>Polygonum tinctorium</i> Ait.	
Indigo de synthèse		Laboratoire PROLABO

### Standards d'argile

Variété	Source	Fournisseur
Attapulгите	Mormoiron (Vaucluse)	Société Expansia
Sépiolite	Apt (Vaucluse)	Ets CHAUVIN
Montmorillonite	Mormoiron (Vaucluse)	Ets SOLARGIL
Argile de Sacalum <sup>3</sup>	Sacalum (Mexique)	Mine in situ
Argile de Ticul	Ticul (Mexique)	Mine in situ

<sup>2</sup> L'*indigofera suffruticosa* est principalement commercialisée au Mexique par la *Coopérative de l'anil* près de Oaxaca.

<sup>3</sup> Les argiles de Sacalum et de Ticul ont été prélevées *in situ*, dans les mines par Sonia Ovarlez et Sandra Zetina.



Pour la détermination des matériaux constitutifs des bleus mayas archéologiques, nous avons eu recours à plusieurs méthodes d'examens et d'analyses physico-chimiques : observation et étude stratigraphique en microscopie optique, spectrométrie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), analyse élémentaire en microscopie électronique à balayage (MEB), et étude colorimétrique.

## **LES EXAMENS : techniques d'observation**

### **La microscopie optique**

Ces examens en lumière visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ) constituent la première étape, souvent essentielle, de tout travail d'observation. Ils sont pratiqués à grossissement croissant, c'est-à-dire à l'aide de loupes, de binoculaires, et de microscopes optiques puis électroniques.

#### Les coupes stratigraphiques

Pour les peintures, on examine des coupes transversales ou coupes stratigraphiques (prélèvement inclus dans une résine) pour obtenir des indications sur la technique picturale et éventuellement l'état de conservation. Les unités de longueur mises en jeu sont de l'ordre du micron.

#### **Matériel**

Microscope : LEICA DMLB 100

Résine : SODY 33 (ESCIL), résine polyester pré accélérée qui polymérise à froid.

#### **Mode opératoire**

Après avoir bien positionné l'échantillon perpendiculairement dans le moule en Téflon et coulé la résine polyester, qui sous l'influence d'un catalyseur polymérise en durcissant au bout de quelques heures à la température ambiante, nous ponçons

progressivement la résine jusqu'à ce que le prélèvement affleure. Le section plane du bloc résine + échantillon est alors polie soigneusement afin de permettre son observation au microscope en lumière incidente réfléchie.

Chaque coupe est observée sous le microscope à un grossissement de 40x, afin de définir le nombre de couches. C'est ce que nous avons appelé la « *description technique* ». Puis une observation plus minutieuse à un grossissement plus important : 100x permettra de définir l'épaisseur de chaque couche, leur régularité, leur homogénéité, leur cohésion, leur granulométrie mais aussi, leur adhésion aux couches inférieures et supérieures. C'est ce que nous avons nommé « *observation détaillée* ».

### La platine chauffante

Nous développons un gradient de température de 25 à 300°C, dans un même espace temps pour s'élever de 1°C. Nous regardons alors tous les changements d'état, d'apparition de matité de brillance, de couleur comme le jaunissement ou le brunissement. Ces observations peuvent nous donner des indications intéressantes sur la nature des matériaux, et notamment la résistance du bleu maya à la chaleur.

## La microscopie électronique à balayage (MEB)

Le pouvoir séparateur d'un microscope optique est limité par la longueur d'onde de la lumière visible ; aucun détail de dimension supérieure à 0,2  $\mu\text{m}$  ne peut être observé. Aussi l'utilisation de particules accélérées de plus courte longueur d'onde associée permet-elle d'augmenter le grossissement. Il existe deux types de microscope électronique : à transmission, ils ne permettent d'observer que des échantillons d'épaisseur suffisamment faible pour être transparents aux électrons (quelques dizaines de nanomètres) ; à réflexion, ils opèrent à la surface d'objets massifs.

Ces microscopes sont dits à *balayage* lorsque l'image est obtenue point par point. Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Sous l'impact d'un faisceau d'électrons de moyenne énergie (20 keV) focalisé, la matière excitée émet des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires. La détection de ces électrons permet d'imager la surface avec une grande profondeur de champ, ce qui permet de voir le relief. Un des avantages de la technique est la facilité avec laquelle on peut travailler à des grossissements très divers (zoom). Un de ses inconvénients est que l'échantillon doit être conducteur, sous peine de se charger électriquement et

de repousser les électrons incidents. Le remède consiste à métalliser la surface à observer (ce qui est inacceptable pour l'observation d'échantillons archéologiques).

Une variante intéressante de cette technique est la microscopie électronique à balayage dite « environnementale ». Elle permet l'observation et l'analyse des échantillons soumis non à un vide secondaire ( $10^{-6}$  torr), mais à une atmosphère humide (pression de l'ordre de 10 à 50 torrs), ce qui permet d'éviter de métalliser les échantillons non conducteurs. Pour nos observations, nous avons utilisé un Philips XL30 ESEM.

### Matériel

ESEM (*Environmental Scanning Electron Microscope*). Philips XL 30 du CEMEF de l'Ecole des Mines de Paris.

### Mode opératoire

Les échantillons sont des coupes polies enrobées dans un polymère transparent. Ils ne sont pas dorés.

Observation et analyse élémentaire sont réalisés sur chacune des couches de la stratigraphie.

## L'ANALYSE ELEMENTAIRE

Ce type d'analyse par excitation physique d'un matériau est issu de l'invention de la microsonde électronique par Castaing, dans les années 1950. Cette détermination qualitative et quantitative des *éléments* chimiques présents dans des micro volumes allait révolutionner la métallurgie et la minéralogie. Elle n'a cessé de gagner en sensibilité et en précision.

Mais élémentaire, c'est-à-dire rustique, ce type d'analyse l'est aussi lorsque le matériau analysé comporte une part non négligeable de composés organiques, composés pour laquelle la simple détermination des éléments chimiques est terriblement insuffisante. Donnons-en un exemple.

L'analyse par EDX d'un pain d'indigo fabriqué de nos jours selon les méthodes traditionnelles à Oaxaca (Mexique), effectuée dans les conditions ordinaires (c'est-à-dire en négligeant la présence de carbone, d'oxygène et d'hydrogène) donne les résultats suivants en pour-cent atomiques :

P 35% ; Si 24% ; Ca 17% ; Al 17% ; et Mg 7,5%

Ce qui est tout à fait intéressant puisque l'on retrouve des teneurs en phosphore analogues dans certains échantillons archéologiques.

La prise en compte du carbone et de l'oxygène dans les calculs de teneurs donne :

C 68% ; O 31% ; P 0,3% ; Si 0,3% ; Ca 0,2% ; Al 0,2% ; Mg 0,1%.

L'absence de carbonates ayant été prouvée par diffraction de rayons X (qui ne détecte que de la matière amorphe et un peu de quartz), le carbone est presque sûrement organique. Ce pain d'indigo qui paraissait avoir une forte teneur en phosphates se révèle donc beaucoup plus pur que l'on ne l'aurait cru au premier abord.

## La spectrométrie X en dispersion d'énergie (EDS)

Les microscopes électroniques à balayage sont souvent équipés d'un détecteur des photons X émis par la matière excitée par le faisceau d'électrons primaires. La détermination de leur énergie permet de caractériser l'élément émetteur ; leur comptage rend possible le calcul des concentrations. Cette technique, la spectrométrie X en dispersion d'énergie (EDXS, abrégée en EDX ou EDS) permet de déterminer rapidement, et avec une précision suffisante pour nos besoins courants, la composition élémentaire du matériau, soit ponctuellement (c'est-à-dire dans un volume de l'ordre du  $\mu\text{m}^3$ ), soit sur une aire plus étendue.

En calant le spectromètre sur une énergie particulière, et en balayant l'échantillon, on peut réaliser une carte de la répartition de cet élément sur l'aire explorée.

Jusqu'à une date récente, la majorité des détecteurs ne pouvaient pas détecter les éléments légers (carbone, azote et oxygène). Cette détection est plus courante aujourd'hui. Mais ces éléments étant détectés par une autre famille de raies que les éléments plus lourds, on ne peut faire de calcul précis de la composition globale.

### Matériel

Système INCA de TRACOR avec détection des éléments légers, monté sur l'ESEM Philips XL30 du CEMEF de l'Ecole des Mines de Paris.

## La spectrométrie à émission de rayons X induite par particule chargées (PIXE)

La technique PIXE (*Proton Induce X rays Emission*) est une proche parente de la précédente. L'excitation ne se fait plus par des électrons accélérés sous 20 keV, mais par des protons accélérés sous 2,6 MeV, ce qui permet d'opérer à l'air libre et non sous vide. Cette technique, plus coûteuse, présente deux avantages, sa haute sensibilité et la bonne précision avec laquelle on calcule les concentrations. Cela lui permet d'étendre les analyses aux éléments traces, présents à très faible

concentrations. Cette possibilité peut se révéler précieuse, bien que le problème d'interprétation de la présence d'éléments traces dans les échantillons archéologiques soit extrêmement complexe.

## L'ANALYSE NON ELEMENTAIRE

### La spectrométrie d'absorption infrarouge<sup>4</sup>

Quand on apporte de fortes énergies à un échantillon, comme c'est le cas par une flamme, un plasma, des rayons X, des ions ou des électrons, celui-ci réagit en émettant des rayonnements et des particules qui sont caractéristiques des atomes ou molécules présents.

Le rayonnement infrarouge a une énergie plus faible, qui est de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des atomes entre eux dans les molécules, c'est-à-dire les arrangements que les atomes constituent pour former des composés. Lorsqu'on envoie un faisceau d'infrarouge, certaines longueurs d'onde sont transmises, d'autres qui correspondent exactement aux énergies de vibration ou de rotation des atomes dans la molécule, sont absorbées. Les spectres correspondants sont enregistrés et comparés aux spectres de référence ou « standards » répertoriés. Cela permet d'identifier la molécule concernée. La principale application de l'infrarouge est l'analyse fonctionnelle, c'est-à-dire l'analyse des fonctions chimiques présentes dans l'échantillon. L'avantage majeur du FTIR est sa rapidité à enregistrer les informations et à tracer le spectre.

#### Matériel

Spectrophotomètre à transformée de Fourier : MATTSON série 1000, UNICAM.

Station de calcul : KENITEC 386 SX-20.

Logiciel : First.

Accumulation : 50 spectres.

#### Mode opératoire

L'échantillon est broyé puis mélangé à du bromure de potassium KBr. Nous réalisons une pastille, grâce à un compresseur (pression 10 tonnes), qui est analysée avec l'air comme référence. Le logiciel FIRST gère une bibliothèque de spectres de

---

<sup>4</sup> BELLAMY, L. J. *The infrared spectra of complex molecule*. 1966.

ROUESSAC, F. *Analyse chimique, méthodes et techniques instrumentales modernes*. 1992, p.179.

composés standards. L'analyse d'un échantillon inconnu est comparée à cette banque de données afin d'établir une première identification de sa nature.

Etant donné la grande expérience acquise, par madame Vieillescazes du Laboratoire de chimie appliquée à l'Art et l'Archéologie de l'Université d'Avignon dans le domaine de l'analyse des matériaux de l'art, nous utiliserons sa méthode pour l'interprétation des spectres. Les spectres que nous obtiendrons seront donc présentés en transmittance (%), rapport entre la puissance d'un faisceau qui a traversé un milieu absorbant et sa puissance initiale, en fonction de la longueur d'onde exprimée en  $\text{cm}^{-1}$ . Cette méthode d'analyse servira à identifier les bleus mayas et ses composantes.

## AUTRE METHODE D'ETUDE : LA COLORIMETRIE

La colorimétrie permet de caractériser objectivement une couleur par trois paramètres. Elle nous servira à évaluer la richesse de la palette chromatique utilisée par les Mayas, et à comparer de ce point de vue divers décors répartis dans l'espace et le temps.

### Espace des couleurs

Une couleur peut être caractérisée par trois paramètres<sup>5</sup> :

- la *teinte* (ou *longueur d'onde*) qui distingue le rouge du jaune,
- la *saturation* (ou *pureté d'excitation*) qui différencie le rouge du rose,
- la *clarté* (appelée aussi *luminance*, *réflectance*) qui diminue du rouge vif au rouge sombre. La luminosité est le rapport de la lumière réfléchiée par la surface à la lumière qu'elle reçoit. Elle se mesure en pour-cent. 0% correspond au noir ; 100%, au blanc.

La méthode de mesure que nous avons utilisée consiste à envoyer une lumière incidente blanche étalon sur la couche picturale. La lumière non absorbée est récupérée et soumise à une analyse trichromatique. La mesure des couleurs est effectuée à l'aide d'un colorimètre. Les valeurs obtenues servent de base au calcul de différents jeux de paramètres.

Définie par trois paramètres, une couleur peut donc se représenter dans un espace tridimensionnel, appelé *espace colorimétrique* ou *espace des couleurs*. On n'a encore jamais défini d'espace des couleurs décrivant bien les particularités de la

---

<sup>5</sup> BILLMEYER, F ; W et SALTZMAN, M. *Principles of color Technology*. Ed. J. Wiley and sons, 1981. 240 p.

vision humaine des couleurs qui soit simple mathématiquement<sup>6</sup>. Il en existe donc un certain nombre.

Nous travaillerons avec plusieurs d'entre eux, profitant de leurs avantages respectifs. Tous ont en commun leur axe vertical qui est l'axe des clartés.

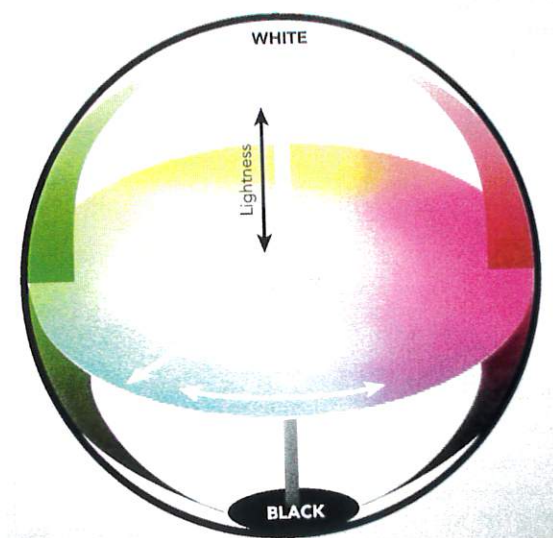


Fig. 46 : Principe de la représentation des couleurs dans un espace 3D.

## 1 . L'espace colorimétrique CIE 1931

Assez commode, bien que sa métrique soit riemannienne, c'est-à-dire varie localement. Une couleur s'y résume par les trois nombres,  $x$ ,  $y$ , et  $Y$ , ce dernier étant la clarté.

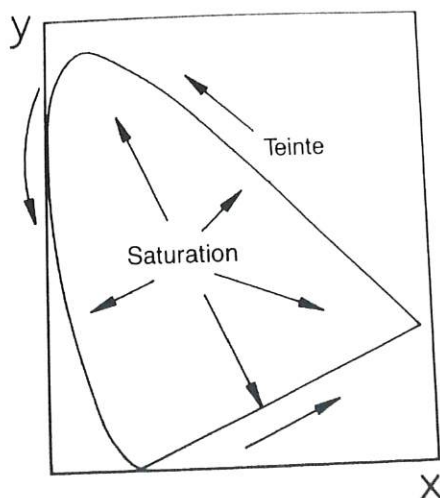


Fig. 47 : Diagramme de chromaticité CIE 1931. Plan  $xOy$  de l'espace colorimétrique CIE 1931.

<sup>6</sup> DELAMARE, F. *Vision et mesure de la couleur*, in *Datation-Characterisation en peinture pariétale et murale*, éd par F. Delamare, T. Hackens et B. Helly, PACT 17, 1987, Louvain, p. 195-222.

Très classiquement, nous n'en utiliserons qu'un sous-espace, sa projection dans le plan  $xOy$ , souvent appelée *diagramme de chromaticité*. Ce plan est perpendiculaire à l'axe des clartés qui s'y projette au point W.

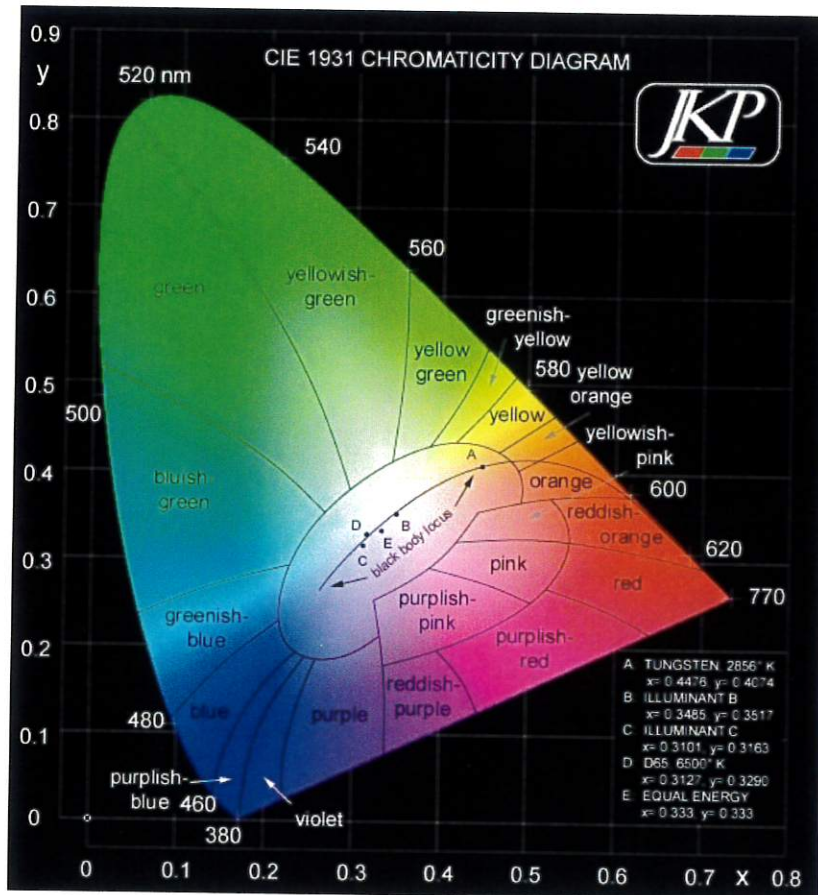


Fig. 48 : Diagramme de chromaticité CIE 1931. Plan  $xOy$  de l'espace colorimétrique CIE 1931 et représentation des différents illuminants. L'illuminant blanc (C) est celui utilisé pour nos mesures. Les longueurs d'onde sont graduées en nm

Les paramètres  $x$  et  $y$ , fonction complexes de la teinte et de la saturation, sont tels que les points représentatifs des lumières colorées monochromatiques se trouvent répartis sur la courbe en fer à cheval (*spectrum locus*), courbe que l'on peut graduer en longueurs d'ondes du bleu (à gauche) au rouge (à droite). Le point représentatif d'un pigment ou d'un mélange de pigments, dont la clarté est forcément plus faible que celle de la lumière, est situé à l'intérieur de l'aire ainsi déterminée. Le mélange de deux couleurs différentes A et B produit toute une série de couleurs intermédiaires qui se répartissent sur une courbe reliant les points A et B. Si l'une de ces couleurs est le blanc, la courbe décrit la désaturation de la couleur ; c'est une *géodésique* de cet espace colorimétrique, c'est-à-dire le plus court chemin entre un point et W. L'un des inconvénients de cet espace est la difficulté d'y calculer des écarts de couleurs.



## 2 . L'espace colorimétrique CIELAB

Dans l'espace CIELAB, grâce aux valeurs  $L^*a^*b^*$  ou  $L^*C^*h^*$ , nous sommes passés dans un nouvel espace beaucoup plus simple de repérage et également plus uniforme.

### $L^*a^*b^*$

L'espace  $L^*a^*b^*$  a été conçu spécialement pour calculer les écarts de couleurs à l'aide du théorème de Pythagore. Le plan perpendiculaire l'axe des clartés est orientés à la manière des points cardinaux selon deux axes, bleu-jaune (a) et vert-rouge (b).

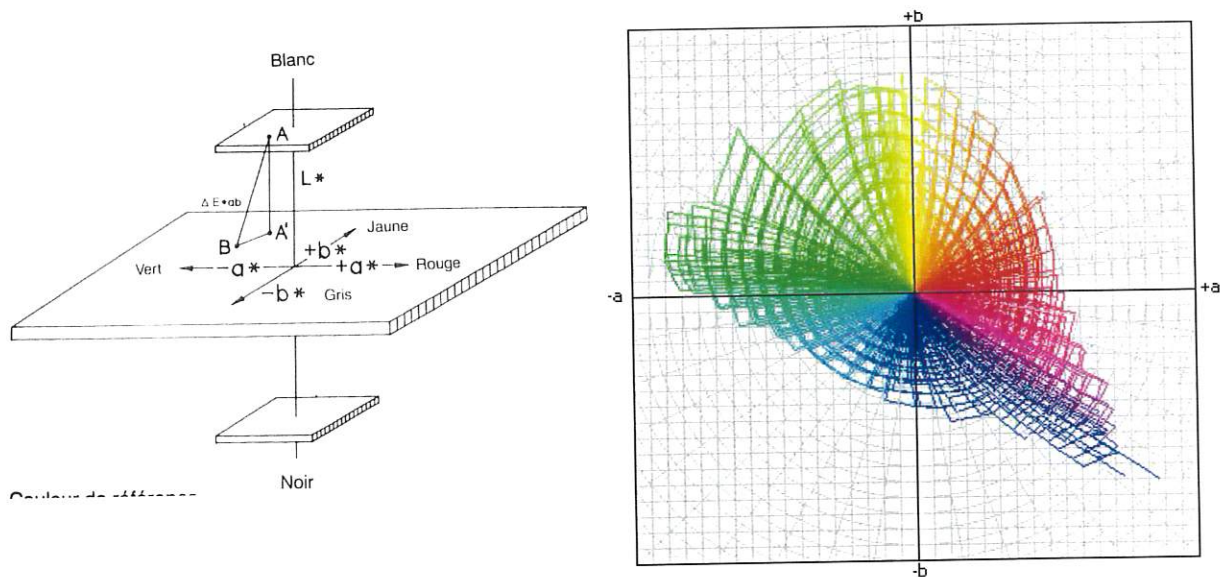
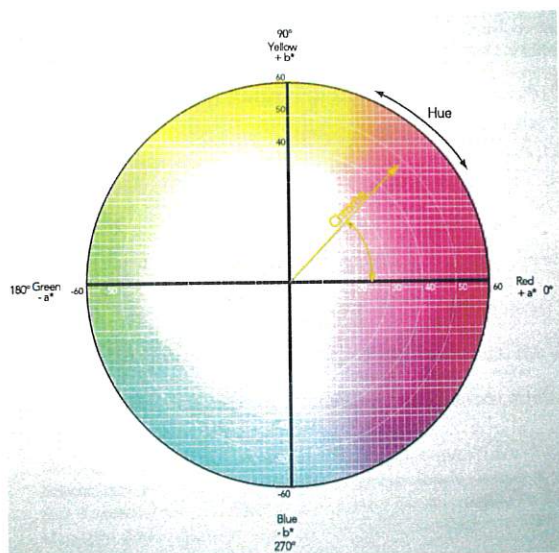


Fig. 49 : Représentation de l'espace colorimétrique  $L^*a^*b^*$

### $L^*C^*h^*$



C'est le même espace colorimétrique que  $L^*a^*b^*$  où  $C^*$  représente la saturation et  $h^*$  la teinte. La valeur de  $h$  correspond à un angle.

Fig. 50 : Représentation de l'espace colorimétrique Lch.

## Matériel

La mesure des couleurs que nous pratiquons est globale, intégrée. Elle est effectuée à l'aide d'un colorimètre portable et autonome Minolta Chromamètre CR-200b utilisant l'illuminant C (6774K). Cet appareil nous a été prêté par l'École des Mines de Paris. L'aire sur laquelle se fait la mesure est un cercle de 8mm de diamètre.

Les deux limitations principales de cette méthode sont l'impossibilité d'effectuer des mesures sur les rehauts fins. Ensuite il est de première importance de sélectionner pour ces mesures des portions de couches picturales de couleur homogène et aussi peu endommagées que possible. Il faut donc écarter les juxtapositions, de même que les couches usées laissant apparaître les couches sous-jacentes, ce qui limite en général les points de mesure réalisables sur les couches picturales anciennes.

## Mode opératoire

Chaque mesure n'est donc effectuée qu'après une étude méticuleuse de la couche picturale. Elle s'accompagne de la description en langage courant de la couleur mesurée, observée à l'œil nu dans les conditions ordinaires en faisant abstraction des problèmes de température de couleur de l'éclairage. Nous réaliserons au minimum deux mesures pour chaque couleur étudiée pour vérifier la reproductibilité des mesures. Parfois il a été nécessaire d'humidifier légèrement la zone de mesure pour les peintures murales de l'aire maya à cause de la gêne occasionnée par une épaisse couche de carbonatation, de sels et d'algues.

### 3 . Emploi d'un atlas colorimétrique Munsell HVC

Nous nous sommes attachés à contrôler la fiabilité des observations qu'il est possible de faire en utilisant un atlas colorimétrique appartenant au *Laboratorio de Diagnostico de Obras de Arte* de l'*Instituto de Investigaciones Esteticas (IIE)* de Mexico . Pour ces comparaisons nous avons mesuré avec notre propre équipement les étalons Munsell. Nous avons ensuite comparé les valeurs obtenues avec celles théoriques<sup>7</sup>. Les mesures des bleus et verts des peintures murales de l'aire maya avec le Munsell a été réalisé avec Sandra Zetina de l'IIE.

---

<sup>7</sup> Valeurs calculées mathématiquement par Nexwhall, Nickerson, et Judd.  
<http://standards.gretamacbeth.com/Munsell/Software/Files/mutable.prn>

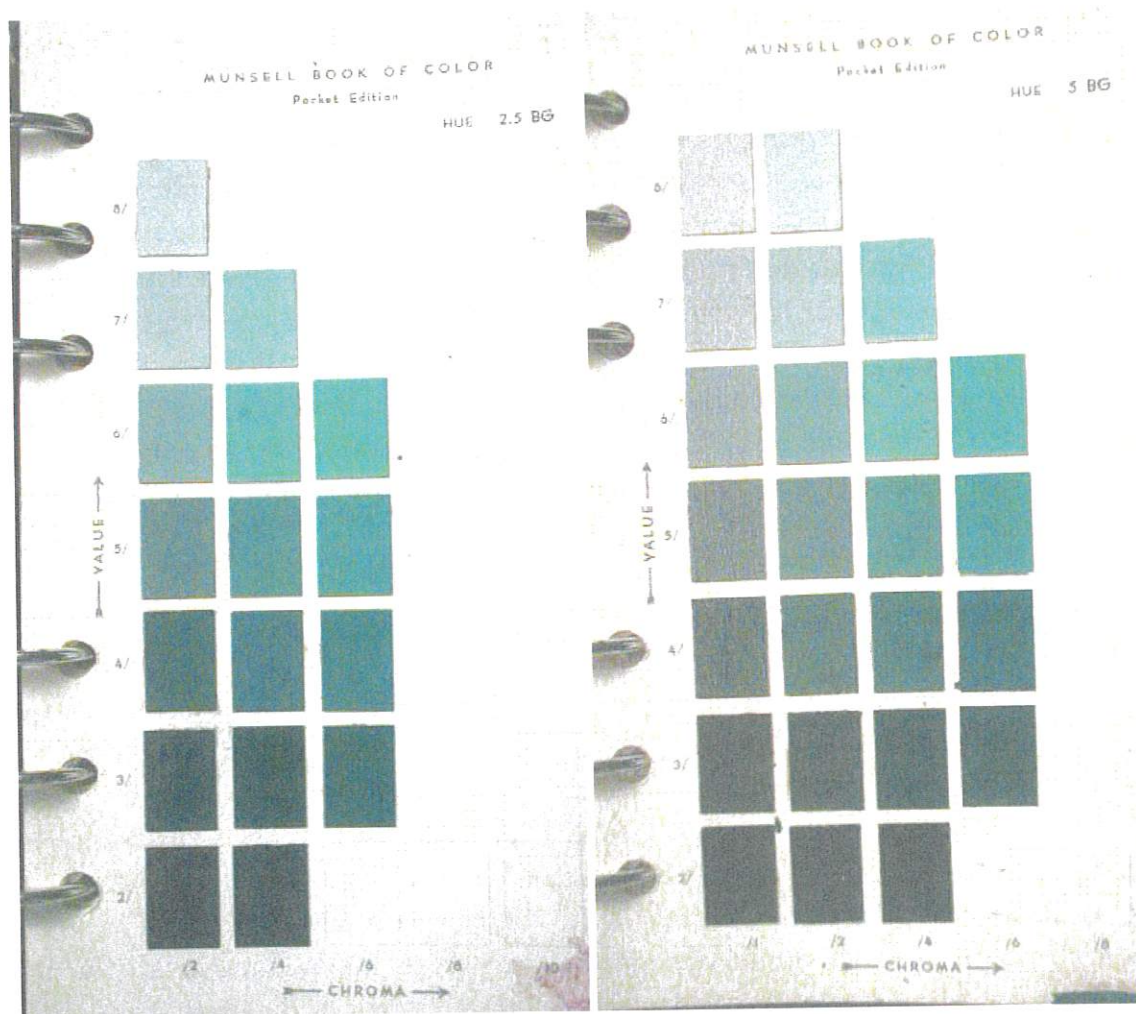


Fig. 51: Code ou Atlas Munsell de bleu-vert.

L'atlas Munsell est constitué d'étalons de couleur qui sont composés de trois paramètres : H, hue : la teinte ; V, value : la clarté et C, chroma : la saturation. Il existe une terminologie spécifique à la teinte : R pour le rouge, Y pour le jaune, B pour le bleu, G pour le vert et P pour le violet. Les couleurs intermédiaires sont désignées par deux lettres : BG pour le bleu vert. A ces lettres est associé un chiffre qui correspond aux nuances. Par exemple 2,5 BG est plus vert que 5 BG. La mesure se fait par comparaison visuelle des étalons et de la couleur étudiée.

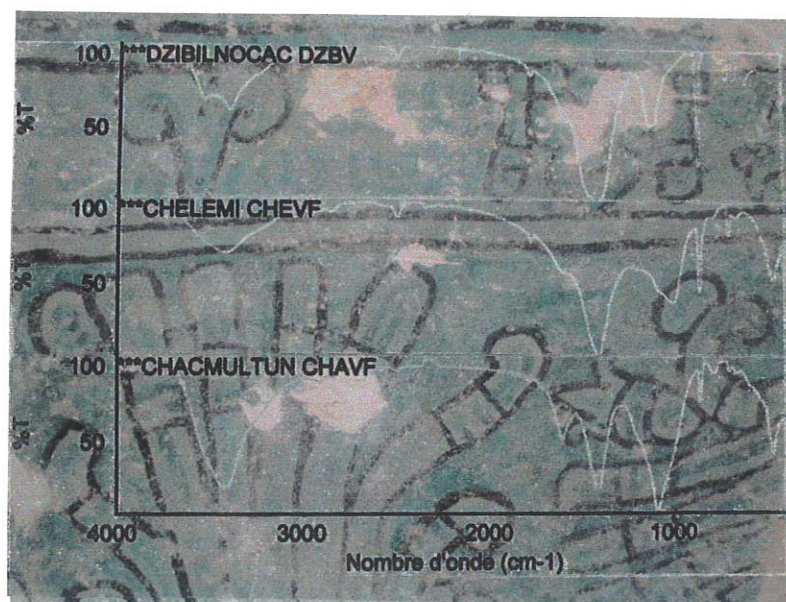


Spectres infrarouge à Transformée de Fourier,  
Echantillons archéologiques, Yucatán, Mexique  
Tulum, Quintana Roo, Mexique,  
Peinture murale, structure 16, Temple de « los dioses descendente »  
Postclassique terminal  
© photo Sonia Ovarlez

## Chapitre 4

---

# Analyse physico-chimique





L'étude d'un objet archéologique ou d'une œuvre d'art est un secteur à part dans le domaine de la physico-chimie car plusieurs paramètres sont à prendre en compte dont le plus drastique est la quantité de matière qu'il est possible de prélever.

Avant de se lancer dans une série d'analyses il est conseillé de connaître les matériaux constitutifs de l'œuvre pour ne réaliser qu'un minimum d'intervention. Une étude préliminaire est nécessaire pour identifier la nature des composés présents ou susceptibles d'être présents : c'est l'établissement d'une base de données de « standards ».

Pour caractériser la technique picturale nous nous proposons dans un premier temps, d'observer la stratigraphie des différentes couches ; puis dans un deuxième temps, à l'aide d'analyses physico-chimiques (IRTF et MEB/EDX) d'identifier successivement les divers charges et pigments.

Puis nous synthétiserons les résultats afin de définir les techniques picturales méso-américaines.



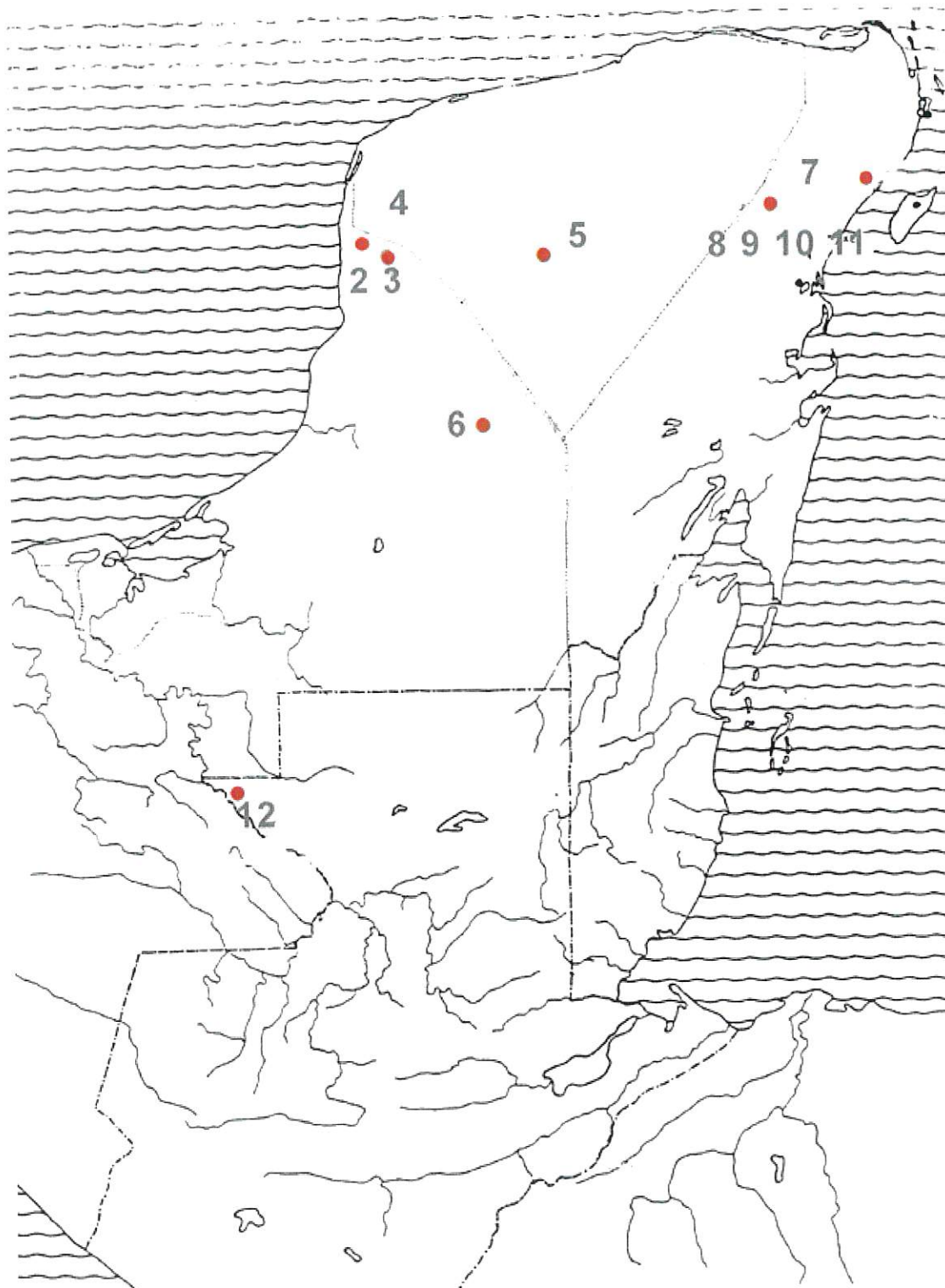


Fig. 52 : Carte de la péninsule du Yucatán – Localisation géographique des échantillons étudiés

# 1

## Première approche des techniques picturales: étude de coupes transversales en microscopie optique

Les différents éléments de la technique picturale : nombre de couches, uniformité et valeur de leur épaisseur, broyage, couleur et dispersion des pigments, seront comparés pour définir les constantes ou les évolutions de la pratique artistique chez les Mayas. L'étude stratigraphique a été réalisée sur douze échantillons appartenant à une collection privée.

4	5	6	7
12	2	1	3
8	10	9	11











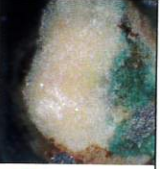



Fig. 53 : photo des échantillons provenant du Mexique

N°	Nom	couleur	origine	époque
1	I1 VC	Vert clair	ICHMAC (Campêche-Mexique)	Classique terminal
2	I2 VF	Vert bleu et gris	ICHMAC (Campêche-Mexique)	Classique terminal
3	I3 VJ	Vert jaune luisant	ICHMAC (Campêche-Mexique)	Classique terminal
4	CHEVF	Vert foncé	CHELEMI (Campêche-Mexique)	Classique terminal
5	CHAVF	Vert bleu vif	CHACMULTUN (Yucatán-Mexique)	Classique terminal
6	DZBV	Bleu clair	DZIBILNOCAC (Campêche-Mexique)	Classique terminal
7	PLBV	Vert bleuâtre foncé	PLAYA (Quintana Roo-Mexique)	Post classique
8	BT1 <sub>I</sub>	Vert bleu clair <i>Surface recouverte de paraloïd</i>	COBA I (Quintana Roo-Mexique)	Post classique terminal
9	BT1 <sub>II</sub>	Vert bleu vif	COBA II (Quintana Roo-Mexique)	Post classique terminal
10	BT1 <sub>III</sub>	Vert clair	COBA I (Quintana Roo-Mexique)	Post classique terminal
11	BT2 <sub>I</sub>	Vert bleuâtre clair <i>Surface recouverte de paraloïd</i>	COBA II El Cuartel (Quintana Roo-Mexique)	Classique terminal
12	BT2 <sub>II</sub>	Vert bleuâtre foncé	LA PASADITA (Guatemala)	Classique terminal

Tableau XI : Nomenclature, couleur, localisation, et datation des échantillons étudiés

# 1 - Description technique

N°		STRATIGRAPHIE
1		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit hétérogène et épaisse</i> (4600 $\mu\text{m}$ soit 4,6 mm) <i>Couche blanche homogène très fine</i> (40 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleue homogène et extrêmement fine</i> (15 $\mu\text{m}$ )
2		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit homogène et épaisse</i> (130 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleue hétérogène et très fine</i> (40 $\mu\text{m}$ )
3		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit homogène et épaisse</i> (100 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche d'enduit blanc fin (30<math>\mu\text{m}</math>)</i> <i>Couche picturale jaune homogène et fine</i> (30 à 40 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleue homogène extrêmement fine</i> (5 à 10 $\mu\text{m}$ )
4		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit hétérogène et épaisse</i> (3000 $\mu\text{m}$ soit 3 mm) <i>Couche picturale bleu foncé homogène et extrêmement fine</i> (10 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleu clair homogène et extrêmement fine</i> (10 $\mu\text{m}$ )
5		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit relativement homogène, rosée et épaisse</i> (1000 $\mu\text{m}$ soit 1mm) <i>Couche d'enduit homogène blanche et plus fine</i> (100 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleu turquoise clair homogène et extrêmement fine</i> (15 $\mu\text{m}$ )
6		Grossissement x40 <i>Couche d'enduit relativement hétérogène, blanchâtre et épaisse</i> (3200 $\mu\text{m}$ soit 3,2mm) <i>Couche picturale bleu foncé ou noire extrêmement fine</i> (10 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale rouge rose plus épaisse</i> (10 $\mu\text{m}$ ) <i>Couche picturale bleu turquoise foncé fine</i> (10 à 20 $\mu\text{m}$ )

7		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit relativement hétérogène, blanc-gris et épaisse (400 µm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise relativement homogène et fine (20 µm)</i></p>
8		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit relativement homogène, blanc rosé et épaisse (700 µm)</i>  <i>Couche d'enduit homogène blanc et plus fine (130 µm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise homogène et très fine (10 µm)</i></p> <p>— pâte à modeler qui maintient l'échantillon</p>
9		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit homogène, blanc rosé et épaisse (500 µm)</i>  <i>Couche d'enduit homogène blanc et plus fine (30 µm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise homogène et fine (20 µm)</i></p>
10		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit relativement homogène, blanc rosé et épaisse (460 µm)</i>  <i>Couche d'enduit relativement homogène blanc et plus fine (180 µm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise homogène et fine (30 µm)</i></p>
11		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit hétérogène rosé et épaisse (2000 µm soit 2 mm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise vif excessivement fine (5 à 10 µm)</i></p>
12		<p>Grossissement x40</p> <p><i>Couche d'enduit orangé hétérogène (2000 µm soit 2 mm)</i>  <i>Couche d'enduit homogène blanc (1300 µm soit 1,3 mm)</i>  <i>Couche picturale rouge homogène et très fine (10 µm)</i>  <i>Couche d'enduit homogène blanc fine (90 µm)</i>  <i>Couche picturale vert clair homogène et fine (40 µm)</i>  <i>Couche picturale bleu turquoise homogène et fine (15 µm)</i>  <i>Couche picturale blanche locale homogène et fine (10 µm)</i></p>

## 1 ICHMAC I1 VC

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit hétérogène et épaisse
- Couche blanche homogène, très fine et lisse
- Couche picturale bleue homogène et extrêmement fine et lisse

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x100



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur régulière. Entre les deux couches pas de séparation nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La surface est régulière. La couche peinte bleu turquoise claire forme une couche vitreuse (non cristalline ?) où s'intercalent des cristaux bleus de teintes et de saturation différentes : bleu clair et foncé.

**ENDUIT**  
Grossissement x250



**Observations :**

Cet enduit est constitué d'une matrice blanche rosée à la granulométrie très fine (proche de celle du bleu maya), peut-être de la chaux, dans laquelle s'insèrent de nombreux agrégats de taille et de couleurs différentes. Les plus gros, blancs, ressemblent à de la calcite ou de la chaux. D'autres plus petits, noirs, rouges, jaunes, transparents (quartz ?) pourraient être minéral. Certains tirant vers le roux ressemblent à des matériaux organiques (gomme ou résine). De plus l'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.

## 2 ICHMAC I2 VF

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit homogène et épaisse
- Couche picturale bleue hétérogène et extrêmement fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur régulière. Entre les deux couches la séparation est nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La surface est régulière. La couche bleue, très fine, est translucide, la couleur est générée par quelques grains bleus épars de différentes teintes : clair et foncé. On note aussi la présence de nombreux petits grains rouges. Matière organique ? : brune ou rousse légèrement translucide et vitreuse

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Cet enduit est beaucoup plus homogène et très « compact ». Il est constitué d'une matrice très blanche à la granulométrie fine (probablement de la chaux). Il a un effet de « poudre ». Seuls quelques rares agrégats translucides et légèrement colorés sont présents (petit cristaux jaunes et orangés). Ici aussi certains agrégats vitreux paraissent être de nature organique.

### 3 ICHMAC I3 VJ

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit homogène et épaisse
- Enduit blanc fin
- Couche picturale homogène et fine jaune
- Couche bleue très fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur plus ou moins régulière.  
Entre les deux couches la séparation est nette.  
Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne.  
La surface est régulière.  
La couche jaune fine est constituée de nombreux cristaux de tailles et de différentes teintes : jaunes clair, orangés, rouge. Pour obtenir un vert, on a superposé un jaune et un bleu. Il semblerait que les mélanges de couleurs ne soient pas fréquents.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Cet enduit blanc-rosé, à la granulométrie fine est homogène. Il n'y a pas d'agrégats et l'on note des zones colorées différentes blanches (d'aspect pulvérulentes) et rose (d'aspect vitreuses et brillantes). Quelques rares petits cristaux jaunes, orangés et noirs sont présents. L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.

### 4 CHELEMI CHEVF

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit hétérogène et épaisse
- Couche picturale bleu homogène et extrêmement fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur irrégulière. La surface est irrégulière.  
Entre les deux couches pas de séparation nette.  
Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne.  
La couche peinte bleu foncé forme une couche vitreuse (non cristalline ?) où s'intercalent des cristaux bleus de teintes et de saturation différentes : bleu clair, foncé,

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

On retrouve un enduit du même type que le n°1  
Cet enduit est constitué d'une matrice blanche rosée à la granulométrie très fine (proche de celle du bleu maya), peut-être de la chaux, dans laquelle s'insèrent de nombreux agrégats de taille et de couleurs différentes. Certains, transparents (quartz ?), noirs (charbons), rouges (roches volcaniques) semblent minéral. D'autres tirant vers le roux ressemblent à des matériaux organiques. L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.

## 5 CHACMULTUN CHAVF

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit relativement homogène, rosée et épaisse
- Couche d'enduit homogène blanche et plus fine

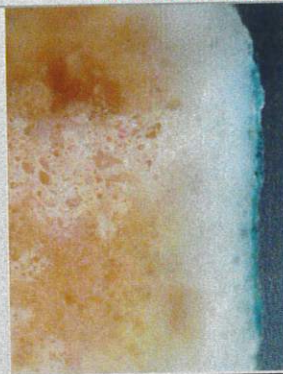
**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur plus ou moins régulière. La surface est relativement régulière.  
Entre les deux couches pas de séparation nette.  
Bonne adhérence entre les couches.  
Bonne cohésion interne.  
La couleur est saturée est cristalline, quelques grains bleus plus foncé parsèment localement cette couche.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Deux types d'enduits sont présents, ils diffèrent par leur couleur et leur nature :  
Le premier, rosé et relativement homogène, possède quelques agrégats translucides bruns.  
Le deuxième sur lequel a été appliquée la couche peinte est blanc et homogène. Son épaisseur est beaucoup plus fine, son apparence est poudreuse.  
L'adhérence entre les deux est bonne.  
Leur cohésion aussi. L'apparence vitreuse de l'enduit rosé pourrait être le signe de la présence d'un liant.

## 6 DZIBILNOCAC DZBV

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit relativement hétérogène, blanchâtre et épaisse
- Couche picturale bleu foncé ou noire extrêmement fine
- Couche picturale rouge rose plus épaisse
- Couche picturale bleu turquoise foncé fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

La couche picturale est formée de trois couches de taille et de couleur différente qui se superposent : noire (dessin ?), rouge et bleu. Chaque couche est homogène mais d'épaisseur irrégulière. La surface est très irrégulière.  
Entre les deux couches la séparation n'est pas nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne.  
La couleur bleue est saturée et cristalline, quelques grains plus foncés parsèment localement cette couche.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Cet enduit hétérogène est constitué d'une matrice blanche à la granulométrie fine et qui est **extrêmement** poreux. De gros agrégats oranges sont visibles ; ils semblent être d'origine organique. De ci, de là, de petits cristaux noirs (charbon). L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.  
La surface est irrégulière.

## 7 PLAYA PLBV

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit relativement hétérogène, blanc-gris et épaisse
- Couche picturale bleu turquoise relativement homogène et fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur fine mais irrégulière. La surface est elle aussi irrégulière.  
Entre les deux couches pas de séparation nette.  
Bonne adhérence entre les couches.  
Bonne cohésion interne.  
La couleur bleue est saturée est cristalline, les cristaux bleus sont de couleurs différentes : clairs et foncés.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Cet enduit hétérogène est constitué d'une matrice blanche à la granulométrie fine et d'apparence vitreuse dans laquelle s'insèrent des zones grises vitreuses elles aussi (cristaux?). Les zones brillantes correspondent à une imprégnation de paraloïd. Aucun agrégat n'est visible. La surface est irrégulière.

## 8 COBA I BT1 I

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit relativement homogène, blanc rosé et épaisse
- Couche d'enduit homogène blanc et plus fine
- Couche picturale bleu turquoise homogène et très fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Couche peinte homogène, d'épaisseur régulière. La surface est régulière elle aussi. Entre les deux couches la séparation est nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La couleur bleue turquoise est saturée. La granulométrie est extrêmement fine, la présence des cristaux bleus est difficilement décelable.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



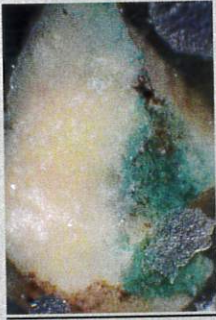
**Observations :**

Deux types d'enduits sont présents, ils diffèrent par leur couleur et leur nature :  
Le premier, rosé et relativement homogène possède quelques agrégats orangés.  
Le deuxième sur lequel a été appliquée la couche peinte est blanc et homogène. Son épaisseur est beaucoup plus fine. Leur granulométrie est très fine.  
L'adhérence entre les deux enduits est bonne. Leur cohésion aussi. La surface est régulière. L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.



## 9 COBA I BT1 II

### STRATIGRAPHIE Grossissement x40



- Couche d'enduit homogène, blanc rosé et épaisse
- Couche d'enduit homogène blanc et plus
- Couche picturale bleu turquoise homogène et fine

### COUCHE PICTURALE Grossissement x250



#### Observations :

Couche peinte homogène, d'épaisseur irrégulière. La surface est irrégulière. Entre les deux couches la séparation n'est pas nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La couleur bleue turquoise est saturée. La granulométrie est très fine, la présence des cristaux bleus est décelable. La surface de la couche picturale possède de nombreuses taches brunes ou noires (crasses et nodules de liant). Ces strates sont imprégnées de paraloïd, résine acrylique de restauration, ce qui donne cet aspect brillant à l'échantillon.

### ENDUIT Grossissement x100



#### Observations :

Il semble qu'il y ait deux types d'enduits présents, ils diffèrent par leur couleur mais leur limite n'est pas clairement visible : Le premier, rosé est homogène. On ne décèle pas d'agrégats. Le deuxième sur lequel a été appliquée la couche peinte est blanc et homogène. Son épaisseur est beaucoup plus fine. Il n'y a pas d'agrégats. Leur granulométrie est très fine. L'adhérence entre les deux enduits est bonne. Leur cohésion aussi. La surface est irrégulière. L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant.

## 10 COBA I BT1 III

### STRATIGRAPHIE Grossissement x40



- Couche d'enduit relativement homogène, blanc rosé et épaisse
- Couche d'enduit relativement homogène blanc et plus fine
- Couche picturale bleu turquoise homogène et fine

### COUCHE PICTURALE Grossissement x250



#### Observations :

La couche bleue verte très claire est homogène, son épaisseur est régulière, tout comme la surface. Il semble qu'il y ait un polissage. La granulométrie est fine. Entre les deux couches la séparation est relativement nette. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La couleur bleue verte est peu saturée. La présence des cristaux bleus plus foncés est décelable.

### ENDUIT Grossissement x100



#### Observations :

Il semble qu'il y ait deux types d'enduits présents, ils diffèrent par leur couleur mais leur limite n'est pas clairement visible : Le premier, rosé est hétérogène. On décèle quelques agrégats orangés dans une matrice dont la granulométrie est fine. Le deuxième sur lequel a été appliquée la couche peinte est blanc et plus homogène. Son épaisseur est beaucoup plus fine ainsi que sa granulométrie. L'adhérence entre les deux enduits est bonne. Leur cohésion aussi. La surface est régulière. L'apparence vitreuse des enduits peut être le signe de la présence d'un liant.

## 11 COBA II BT2 I

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit hétérogène rosé et épaisse
- Couche picturale bleu turquoise vif excessivement fine

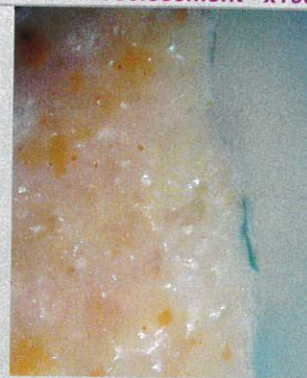
**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

La couche bleu turquoise vif est extrêmement fine et homogène, son épaisseur est irrégulière, tout comme la surface. Sa granulométrie est fine. Bonne adhérence entre les couches. Bonne cohésion interne. La couleur bleu verte est saturée et la présence des cristaux bleus n'est pas décelable.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Cet enduit est constitué d'une matrice rosée à la granulométrie très fine dans laquelle s'insèrent de nombreux agrégats de taille et de couleurs différentes : blancs et oranges et plus petite taille. L'apparence vitreuse des enduits pourrait être le signe de la présence d'un liant. Cet couche possède des brillances dues à l'imprégnation de toutes les strates par du paraloïd, résine acrylique de restauration. La nature de ces agrégats est minérale pour les blancs (chaux ?) et organique pour les oranges. La surface est irrégulière. La cohésion est bonne.

## 12 COBA II BT2 II

**STRATIGRAPHIE**  
Grossissement x40



- Couche d'enduit orangé hétérogène
- Couche d'enduit homogène blanc
- Couche picturale rouge homogène et très fine
- Couche d'enduit homogène blanc fin
- Couche picturale vert clair homogène et fine
- Couche picturale bleu turquoise homogène et fine
- Couche picturale blanche locale homogène et fine

**COUCHE PICTURALE**  
Grossissement x250



**Observations :**

Dessus l'enduit est apposée un très fine couche rouge qui peut être le dessin préparatoire. Son épaisseur est irrégulière. Son adhérence est bonne. Vient ensuite une nouvelle couche blanche qui ressemble par sa texture au dernier enduit sur lequel se trouve le dessin. Sa granulométrie est fine et sa surface plus ou moins régulière. Son adhérence est bonne. On peut émettre l'hypothèse que ce soit un lait de chaux qui sert à accueillir les couleurs et permet une meilleure adhérence que si cette couche était absente.

**ENDUIT**  
Grossissement x100



**Observations :**

Il semble qu'il y ait deux types d'enduits présents, ils diffèrent par leur couleur et leur limite est clairement visible. Le premier orangé est hétérogène. Sa granulométrie est fine et de gros agrégats marrons sont présents. Le deuxième blanc est homogène, sa granulométrie est fine et sa surface plus ou moins régulière. L'adhérence entre ces deux enduits est bonne. Il semble qu'il y ait présence d'un liant organique.

## 2 - Etude comparative

La synthèse de ces observations sous forme de tableau va nous permettre de définir les éléments qui rassemblent et ceux qui différencient d'une manière générale les échantillons. Puis nous approfondirons cette comparaison en fonction de la localisation géographique et de l'époque considérées.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
<b>Support</b>	Nombre de couches	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	
	Couleur couche 1	Rosé Blanc	Blanc	Rosé blanc	Rosé	Rosé Blanc	Blanc	Gris	Rosé Blanc	Blanc	Blanc -rosé blanc	rosé	Rosé Blanc	
	2 <sup>1</sup>													
	Homogénéité	Non Oui	Oui	Oui Oui	Non	Oui Oui	Oui	Oui	Oui Oui	Oui Oui	Oui Oui	Non	Non Oui	
	Régularité de la surface (lisse ou pas)	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui
	Polissage (surface)	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Non
Epaisseur en µm	4600 40	130	100 30	3000	1000 100	3200	400	700 130	500 30	460 180	2000	2000 1300		
<b>Couche peinte</b>	Nombre de couches	1	1	2	2	1	3	1	1	1	1	1	5	
	Couleur	Bleu vert clair	Bleu clair	Jaune  Bleu	Bleu clair  Bleu foncé	Bleu clair	Bleu foncé  Rouge  Bleu clair	Bleu	Bleu vert	Bleu	Bleu vert clair	Bleu	Rouge  Enduit blanc  Vert  Bleu  Beige	
	Homogénéité	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui Pour les 5	
	Régularité de la surface	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	?	Non	
	Polissage	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	
	Epaisseur moyenne n µm	15*	40*	50* 5*	10* 10*	15*	10* 10* 15*	20*	10*	20*	30*	7.5	10 90 40 15 10	
	Interactions entre les couches	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non Oui ?	non	Non	
Hypothèse : nature support	Chau x + sable + liant	Chau x + argile + liant	Chau x + liant	Chau x + sable + liant	Chau x + liant	Chau x + liant	Chau x	Chau x + argile	Chau x + liant	Chau x + liant Lait de chaux	Chau x + sable + liant	Chaux + sable + argile + liant		

Tableau XII : Récapitulatif des techniques

<sup>1</sup> Couche 2 est la couche du support ou enduit sur laquelle vient se poser la couche peinte, c'est donc la dernière couche d'enduit.

Toutefois, au vu du nombre d'échantillons, il convient de rester prudents quand à l'interprétation des résultats.

Nous pouvons faire certaines observations : il semble possible d'établir des groupes techniques en fonction de certaines caractéristiques des supports et notamment la manière de préparation et d'application de ceux-ci.

Etat	site	Epoque	N°	Matériaux hypothèses	Texture	Application
Campêche	ICHMAC	Classique tardif	1	Chaux + sable + agrégats de calcite ou chaux <sup>2</sup> comme charge + liant gommes ou résines	Lisse	Polissage de l'enduit
			2	Chaux + sable + liant gommes ou résines	Lisse	Polissage de l'enduit
			3	Chaux + sable + liant gommes ou résines	Lisse	Polissage de l'enduit
Campêche	CHELEMI	Classique tardif	4	Chaux + sable + inclusions roche volcanique + agrégats de calcite ou chaux comme charge + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
Yucatán	CHACMULTUN	Classique tardif	5	Chaux + sables ?	Irrégulière	Pas de polissage
Campêche	DZIBILNOCAC	Classique tardif	6	Chaux + sable + inclusions minérales + agrégats de calcite ou chaux comme charge + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
Quintana Roo	PLAYA	Postclassique tardif	7	Chaux + inclusion de calcite ou chaux + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
	COBA	Postclassique tardif	8	Chaux + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
	COBA	Postclassique tardif	9	Chaux + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
	COBA	Postclassique tardif	10	Chaux + liant	Lisse	Pas de polissage
	COBA	Classique tardif	11	Chaux + sable + inclusion de calcite ou chaux + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage
	LA PASADITA	Classique tardif	12	Chaux + sable + inclusion de calcite ou chaux + liant gommes ou résines	Irrégulière	Pas de polissage

Tableau XIII : Récapitulatif des techniques de fabrication du support

### Le support :

Les enduits de la période **classique** (1,2,3,4,5,6), quelque soit la région, sont caractérisés par l'**utilisation de charges et de sables dans la matrice de chaux**, ce qui donnent à l'observation des **enduits plus grossiers** que ceux du Postclassique (sauf le 12). En effet, il semble qu'à l'époque **postclassique** le sable soit rarement utilisé.

<sup>2</sup> Chaux éteinte.

Les **enduits** sont **fins**, homogènes, souvent formés de **deux couches** de couleurs différentes et ne présentent pas un travail de polissage comme cela peut être le cas au classique (1,2,3). D'une manière générale ce qui semble caractériser la technique de fabrication des enduits de chaux des mayas, c'est l'intégration quasi parfaite des charges ou sables à la matrice de chaux et surtout l'**utilisation d'un liant organique comme additif**. Nous discuterons plus amplement de l'utilisation des gommés et résines dans la fabrication des supports et de la couleur des enduits dans le chapitre 3 sur les techniques picturales.

Ces deux groupes techniques seraient donc :

1. **Groupe époque classique, avec les échantillons 1,2, 3, 4, 5, 6, 11, 12.**
2. **Groupe époque postclassique, avec les échantillons 7, 8, 9, 10**

### La couche colorée :

La superposition des couches colorées (3,4,6,12) ou le mélange avec d'autres pigments (2) pour obtenir différentes tonalités était une technique très utilisée au classique qui disparaît au postclassique, où le bleu maya était posé en couche unique. D'une manière générale, l'épaisseur des couches peintes est légèrement plus importante au postclassique.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Epaisseur moyenne de la couche picturale en µm</b>	15*	40*	50* 5*	10* 10*	15*	10* 10* 15*	20*	10*	20*	30*	7.5*	10* 90 40* 15* 10
<b>Couleur</b>	Vert clair	Bleu-vert	Vert jaune	Vert foncé	Bleu-vert vif	Bleu	Vert-bleu	Vert-bleu clair	Vert-bleu	Vert-bleu clair	Vert-bleu clair	Vert-bleu foncé
<b>Epoque</b>	Classique terminal						Postclassique			Classique terminal		

\*couche bleue, \*couche jaune, \*couche bleu marine, \*couche rouge, \*couche verte, \*couche blanche, \*couche noire

Tableau XIV : Récapitulatif des techniques de la couche peinte

Les couleurs plus claires sont réalisées par application d'une couche de bleu maya de faible épaisseur sur un enduit blanc fin, qui ajoute à la luminosité du pigment.

La couleur n'est pas uniquement due à l'épaisseur, elle peut se moduler en fonction de la concentration pigmentaire comme pour l'échantillon 10, « vert-bleu clair » de Coba, époque classique.

Comparé à l'échantillon 9 du même site et de la même époque, nous remarquons que le 10 possède une couche peinte plus épaisse tout en ayant une couleur moins vive et moins bleue.

Les valeurs foncées sont obtenues selon quatre techniques différentes :

- a) Superposition d'un ton bleu clair sur un noir (4)
- b) Superposition d'un ton bleu clair sur un vert (12)
- c) Enduit teint dans la masse, c'est-à-dire une couche épaisse (7)
- d) L'introduction de particules pigmentaires rouge et bleu foncé (2)

Ici interviennent à la fois les interactions entre les pigments au niveau optique mais aussi la nature du liant utilisé. En effet l'échantillon 4 est le plus foncé ; cela est probablement dû, hormis le problème de l'encrassement, au liant de type gomme qui fut utilisé et qui influe sur la teinte.

L'étude de Magaloni<sup>3</sup> montre que les couleurs n'étaient pas appliquées sur un enduit frais, selon la technique dite « *a fresco* », mais plutôt à l'aide de gommages végétales. Les mayas auraient donc utilisés une technique « *a secco* » ou « *mezzo fresco* ». Rien dans l'observation des coupes stratigraphiques, nous permet de définir le type de liant utilisé, par contre en regardant la surface de l'échantillon (en fait la couche colorée), nous voyons sur de nombreux échantillons des nodules de matières organiques vitreuses qui ont l'aspect de gommages ou de résines.

### 3 - Synthèse

Nous pouvons donc noter certaines évolutions des techniques de peinture entre la période classique et postclassique :

#### EVOLUTIONS

1. La nature de l'enduit est différente : au postclassique l'utilisation de sable est peu courante, les enduits sont donc un peu plus homogènes.
2. La texture devient plus irrégulière au postclassique.

---

<sup>3</sup> MAGALONI, *op. cit*

3. L'épaisseur de la couche peinte varie : elle augmente à l'époque postclassique.
4. L'utilisation de superposition de couches colorées n'existe plus au postclassique.
5. Il y a une diminution de la gamme de tonalités bleu-vert au postclassique : elle se limite à un seul bleu-vert saturé ou clair.

**En résumé**, il y a donc deux groupes d'échantillons qui apparaissent : ceux du classique et ceux du postclassique. Cependant il y a quelque chose qui rassemble tous ces échantillons :

### CONSTANTE

**L'utilisation d'un liant dans l'enduit.**



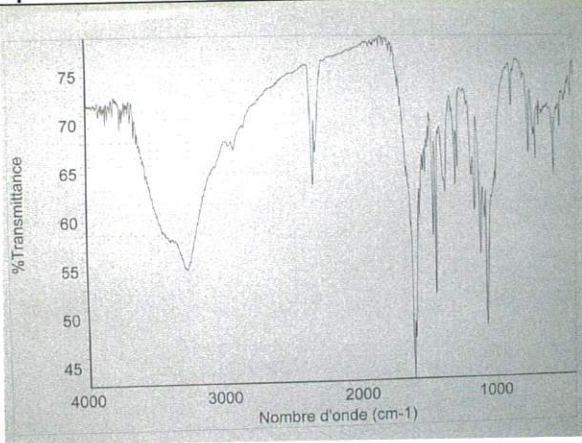
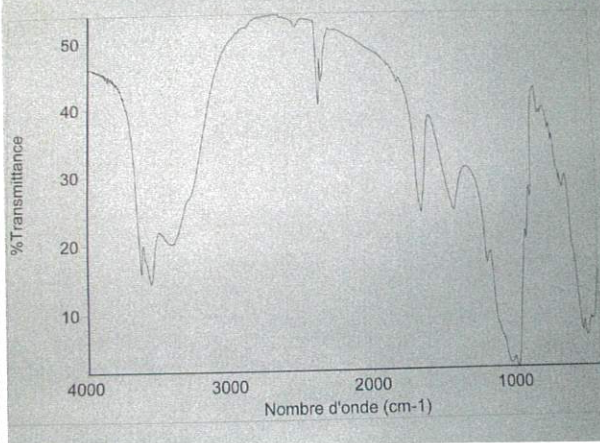


# 2

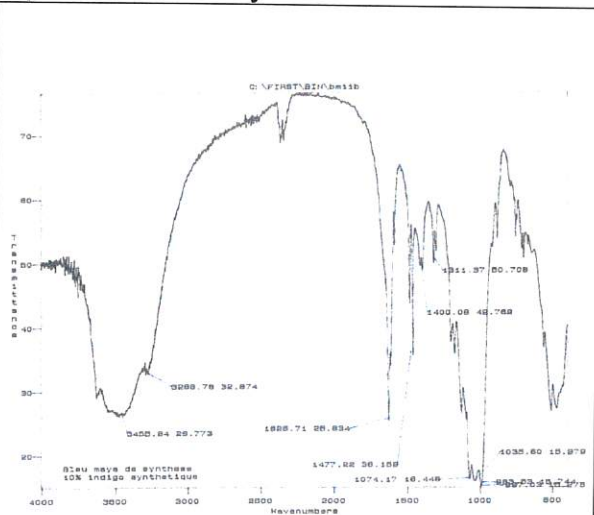
## Quand la science prend l'empreinte des bleus mayas...

### 1 - Spectrométrie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier

Une première approche analytique est réalisée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. La comparaison des empreintes caractéristiques de standards (indigo du Mexique et attapulгите) avec celle du bleu maya artificiel correspondant, permet de dire que: le bleu maya peut être identifié par son spectre infrarouge qui représente la somme de spectres individuels et donc reflète ce mélange de composés.

Spectre de l'indigo synthétique utilisé	Spectre de l'attapulгите
	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bandes caractéristiques : 700-900 <math>\text{cm}^{-1}</math> : C-H aromatique 1000-1250 <math>\text{cm}^{-1}</math> : C-H 1200-1350 <math>\text{cm}^{-1}</math> : C-N 1400, 1477 <math>\text{cm}^{-1}</math> : C=C ou C=N des hétérocycle à 5 atomes 1625.7 et 3267.7 <math>\text{cm}^{-1}</math> : C=O et N-H</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Bandes caractéristiques : 400 – 620 <math>\text{cm}^{-1}</math> 830-1220 <math>\text{cm}^{-1}</math> 1610 <math>\text{cm}^{-1}</math></li></ul> <p>Conformément à la littérature spécialisée.</p>

## Spectre du bleu maya



Par comparaison avec les spectres de l'indigo et de l'attapulгите, nous identifions :

- Bande intense à  $983\text{ cm}^{-1}$  avec un épaulement à  $1035\text{ cm}^{-1}$  correspondant aux longueurs d'onde spécifique à l'attapulгите.
- Zone riche en bandes d'absorption  $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  : celles-ci correspondent aux 3 longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo.

-1500  $\text{cm}^{-1}$

-1477  $\text{cm}^{-1}$  bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes

-1400  $\text{cm}^{-1}$

- Présence de 3 autres bandes

-1625.7  $\text{cm}^{-1}$  fréquence d'élongation  $\nu(\text{C}=\text{O})$

-3268.8  $\text{cm}^{-1}$  fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$  et  $\nu(\text{N-H})$

-3456  $\text{cm}^{-1}$  bande d'hydratation

L'attapulгите n'absorbe pratiquement pas dans la zone  $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  spécifique de l'indigo. Les spectres de l'attapulгите et du bleu maya sont très proches. L'argile masque le colorant.

**Donc après fixation de l'indigo nous retrouvons la large bande d'absorption de l'argile (attapulгите) dont le maximum se situe à  $980\text{ cm}^{-1}$  ainsi que les bandes caractéristiques de l'indigo (indigotine) dans la zone  $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ .**

Nous présentons le spectre de l'attapulгите puisque c'est l'argile principalement utilisée. Notons que l'attapulгите et la sépiolite ne sont pas différenciables avec cette technique, il faudrait réaliser une analyse élémentaire. Les bandes d'absorption sont toutefois plus intenses pour la sépiolite que pour l'attapulгите (cela peut être dû à une quantité de sépiolite plus importante dans la pastille).

De plus, nous ne pouvons affirmer que les palygorskites et les montmorillonites ont des empreintes infrarouge différentes (voir spectres en annexes).

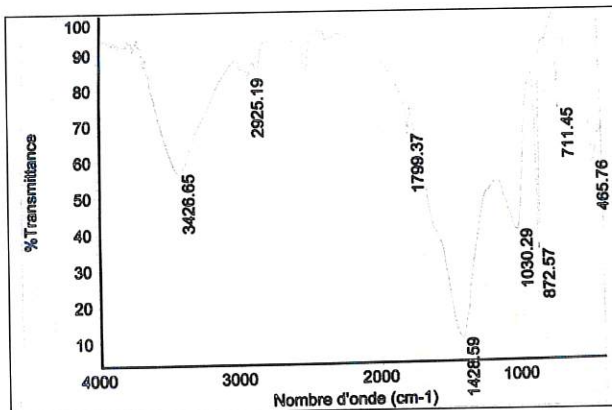
Après avoir réalisé une bibliothèque de spectres de composés standards (annexes), nous avons analysé la couche picturale bleue de chaque échantillon archéologiques. Cette banque de données fut effectuée grâce aux 12 échantillons de la collection privée dont nous avons déjà fait l'étude stratigraphique.

Nous avons pu vérifier que leurs empreintes étaient similaires à celles des échantillons artificiels.

Comme il n'est pas possible de séparer et analyser les constituants des bleus mayas par chromatographie, l'empreinte infrarouge est donc une première étape d'identification des bleus mayas. Afin de compléter et de vérifier ces résultats, une analyse élémentaire est nécessaire. Nous réaliserons une analyse MEB/EDX, présentée dans le chapitre suivant, pour corroborer nos premiers résultats.

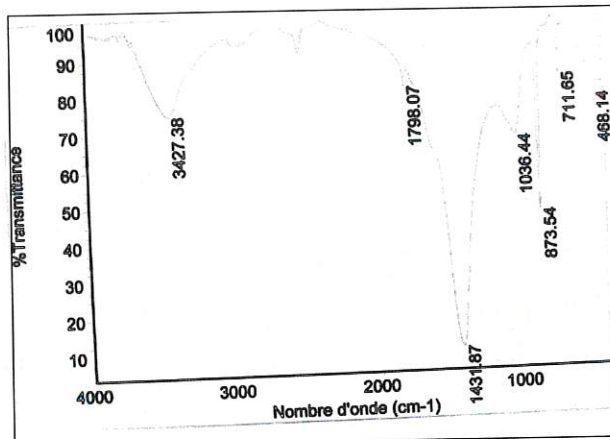
# 1. Résultats d'analyse

## 1 ICHMAC



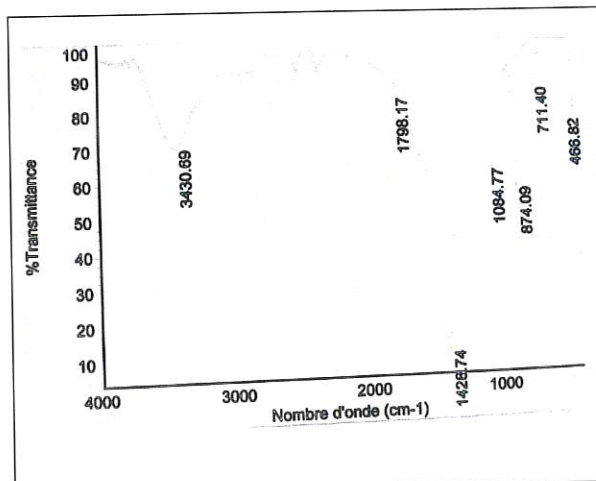
- Bande fine à **872 cm<sup>-1</sup>** avec une bande plus large à **1030cm<sup>-1</sup>** correspondant aux longueurs d'onde spécifiques des Palygorskites (attapulgite et sépiolite). 711cm<sup>-1</sup> et 465cm<sup>-1</sup> appartiennent aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à **1428.59 cm<sup>-1</sup>** : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'une autre bande **-3426.65 cm<sup>-1</sup>** fréquence d'élongation ν(O-H), bande d'hydratation

## 2 ICHMAC



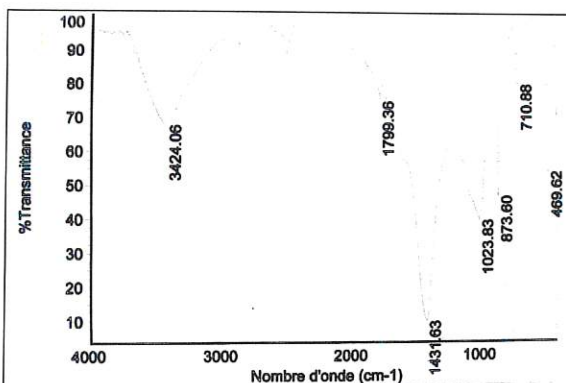
- Bande intense à **873.34 cm<sup>-1</sup>** avec une bande plus large à **1036.44cm<sup>-1</sup>** correspondant aux longueurs d'onde spécifiques de l'attapulgite. 711cm<sup>-1</sup> et 465cm<sup>-1</sup> appartiennent aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à **1431.87 cm<sup>-1</sup>** : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'une autre bande **-3427.38 cm<sup>-1</sup>** fréquence d'élongation ν(O-H), bande d'hydratation

## 3 ICHMAC



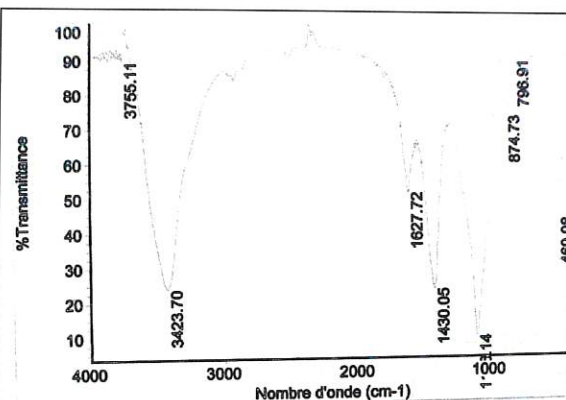
- Bande intense à **874.09 cm<sup>-1</sup>** avec une bande plus large à **1084.77cm<sup>-1</sup>** correspondant aux longueurs d'onde spécifiques à l'attapulgite. 711cm<sup>-1</sup> et 465cm<sup>-1</sup> appartiennent aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à **1428.74 cm<sup>-1</sup>** : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'une autre bande **-3430.69 cm<sup>-1</sup>** fréquence d'élongation ν(O-H), bande d'hydratation

## 4 CHELEMI



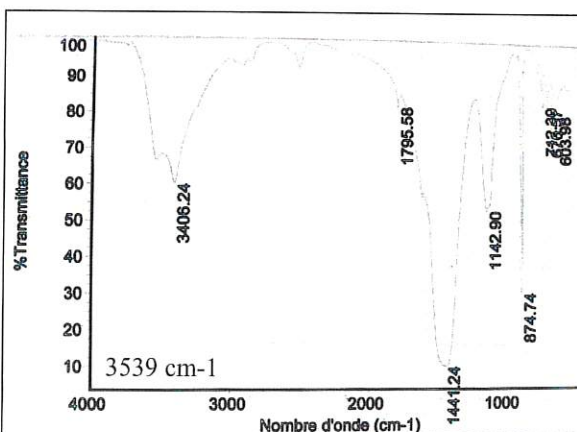
- Bande intense à  $873.60 \text{ cm}^{-1}$  avec une bande plus large à  $1023.83 \text{ cm}^{-1}$  correspondant aux longueurs d'onde spécifiques à l'attapulgite.  $710 \text{ cm}^{-1}$  et  $469 \text{ cm}^{-1}$  appartiennent aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à  $1431.63 \text{ cm}^{-1}$ : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'une autre bande  
- $3424.06 \text{ cm}^{-1}$  fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$ , bande d'hydratation

## 5 CHACMULTUN



- Bande intense à  $874.73 \text{ cm}^{-1}$  à laquelle s'ajoute cette fois une intense bande à  $1030 \text{ cm}^{-1}$  correspondant aux longueurs d'onde spécifiques à l'attapulgite.  $796 \text{ cm}^{-1}$  et  $469 \text{ cm}^{-1}$  appartiennent aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à  $1430.05 \text{ cm}^{-1}$ : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'une autre bande  
- $3423.70 \text{ cm}^{-1}$  très intense fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$ , bande d'hydratation

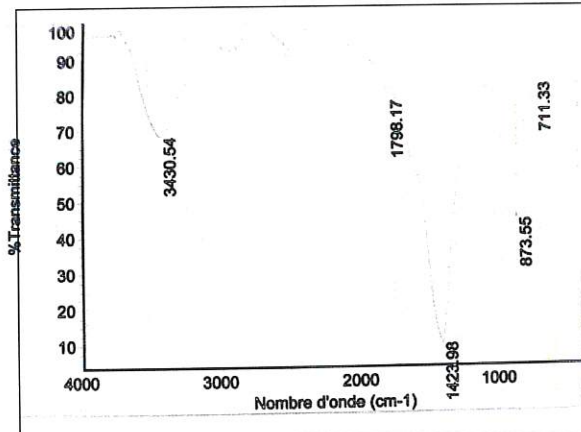
## 6 DZIBILNOCAC



La présence de carbonates inorganiques, avec de fortes bandes d'absorption, perturbent la lecture des autres bandes.

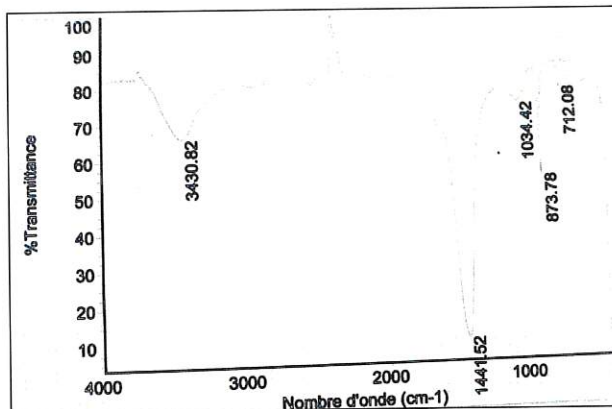
$874,74 \text{ cm}^{-1}$  et  $1441,24 \text{ cm}^{-1}$  sont les bandes caractéristiques du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$

## 7 PLAYA



- Bande intense à 873.55 cm<sup>-1</sup> correspondant à la longueur d'onde spécifique de l'attapulgite. 711.33 cm<sup>-1</sup> appartient aussi aux palygorskites.
- Bande intense et un peu élargie à 1423.98 cm<sup>-1</sup> : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence d'un autre bande : la bande d'hydratation -3430.54 cm<sup>-1</sup> fréquence d'élongation ν(O-H)

## 8 COBA 1 BT1 I

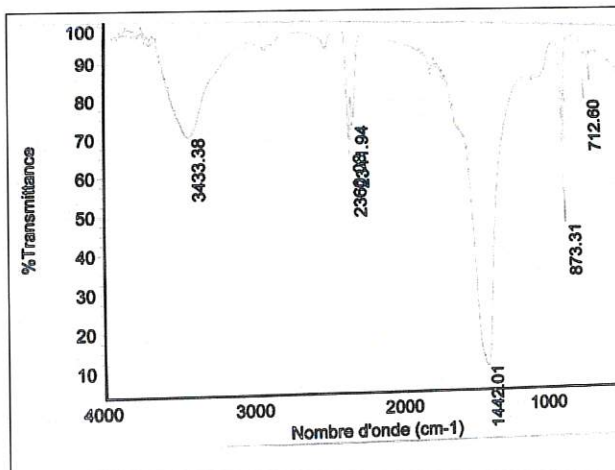


La présence de carbonates inorganiques, avec de fortes bandes d'absorption, perturbent la lecture des autres bandes.

873,78 cm<sup>-1</sup> , 1441,52 cm<sup>-1</sup> , et 712,06 cm<sup>-1</sup> sont les bandes caractéristiques du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>

Toutefois notons la présence d'une bande peu intense à 1034,42 cm<sup>-1</sup> qui pourrait correspondre à l'argile

## 9 COBA 1 BT1 II

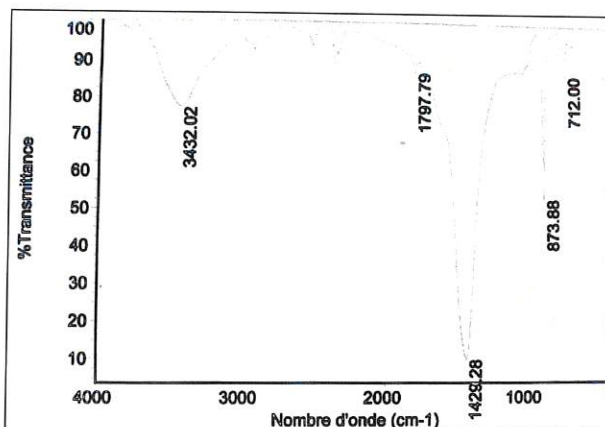


La présence de carbonates inorganiques, avec de fortes bandes d'absorption, perturbent la lecture des autres bandes.

873,31 cm<sup>-1</sup> , 1442,01 cm<sup>-1</sup> , et 712,60 cm<sup>-1</sup> sont les bandes caractéristiques du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>

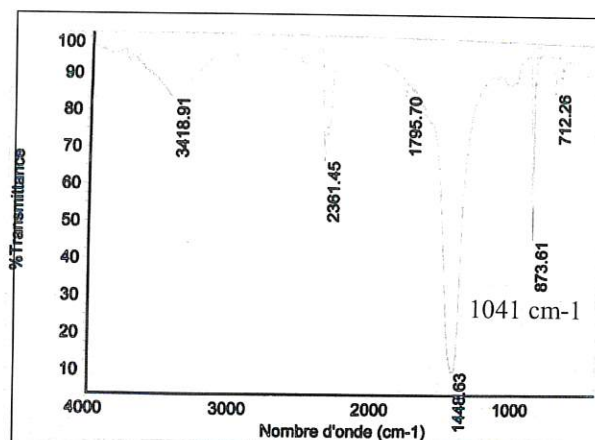
Toutefois notons la présence d'une bande peu intense à 1030 cm<sup>-1</sup> qui pourrait correspondre à l'argile

## 10 COBA 1 BT1 III



- Bande intense à  $873.88 \text{ cm}^{-1}$  sans bande à  $1030 \text{ cm}^{-1}$  correspondant à la longueur d'onde spécifique de l'attapulгите.
- Bande intense et une peu élargie à  $1428.28 \text{ cm}^{-1}$  : celle-ci correspond aux longueurs d'onde caractéristiques de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence de la bande d'hydratation  
- $3432.02 \text{ cm}^{-1}$  fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$

## 11 COBA 2 BT2 I

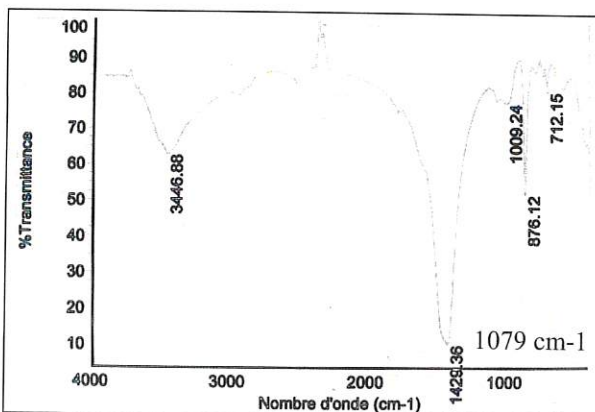


**La présence de carbonates inorganiques, avec de fortes bandes d'absorption, perturbent la lecture des bandes.**

$873,61 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1448,63 \text{ cm}^{-1}$ , et  $712,26 \text{ cm}^{-1}$  sont les bandes caractéristiques du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$

- Présence de la bande d'hydratation  
- $3418.91 \text{ cm}^{-1}$  peu intense fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$

## 12 LA PASADITA



- Bande intense à  $876.12 \text{ cm}^{-1}$  avec une bande peu intense à  $1009.24 \text{ cm}^{-1}$  correspondant aux longueurs d'onde spécifiques de l'attapulгите.  $712.15 \text{ cm}^{-1}$  appartient aussi aux palygorskites.
- Bande intense et une peu élargie à  $1429.36 \text{ cm}^{-1}$  : celle-ci correspond à la longueur d'onde caractéristique de l'indigo (bandes C=C ou C=N des hétérocycles à 5 atomes)
- Présence de la bande d'hydratation  
- $3446.88 \text{ cm}^{-1}$  fréquence d'élongation  $\nu(\text{O-H})$

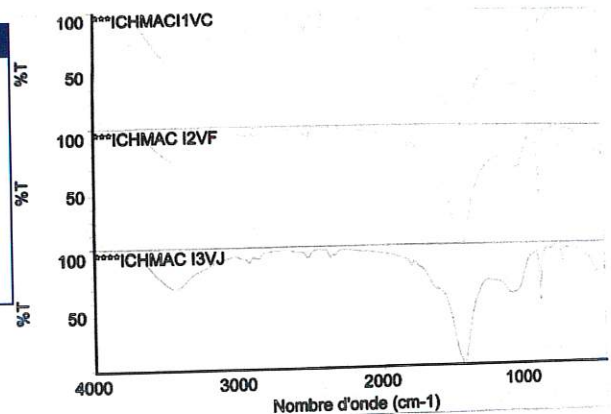
## 2. Interprétation

Nous pouvons classer les échantillons de bleus mayas archéologiques analysés en 2 groupes en fonction de la présence ou non de la bande à 1030 cm<sup>-1</sup>, qui correspond à la bande d'absorption des silicates comprise entre 1100 et 900 cm<sup>-1</sup>, c'est-à-dire aux argiles. La superposition des différentes empreintes IR amène aux conclusions suivantes :

### ➤ Présence de la bande d'absorption à 1030 cm<sup>-1</sup>

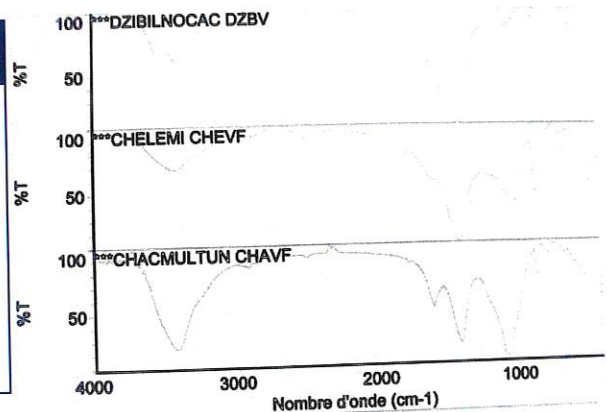
1 ICHMAC I1 VC	2 ICHMAC I2 VF	3 ICHMAC I3 VJ
3426.65	3427.38	3430.69
2925.19		
1799.37	1798.07	1798.17
1428.59	1431.87	1428.74
1030.29	1036.44	1084.77
872.57	874.54	874.09
711.45	711.65	711.40
465.76	468.14	466.82

Pour ces 3 échantillons la bande est moyenne.  
Les 3 spectres sont identiques.



6 DZIBILNOCAC DZBV	4 CHELEMI CHEVF	5 CHACMULTUN CHAVF
3406.24	3424.06	3755.11
1795.58	1799.36	3423.70
1441.25	1431.63	1627.72
1142.90	1023.84	1430.05
874.74	873.60	1030.14
712	710.88	874.73
670		796.91
608		
	469.62	469.08

Pour ces 3 échantillons la bande est forte.



La couche picturale bleue des échantillons 1, 2, 3, 4, 5, 6 contient une argile (l'attapulгите pour 1, 2, 3 ? et la sépiolite pour 4, 5, 6 ?)

Mais pour pouvoir affirmer ces observations il faudrait identifier l'argile par diffractions de rayons X. Les empreintes des bleus mayas archéologiques sont similaires à celles des bleus mayas artificiels.

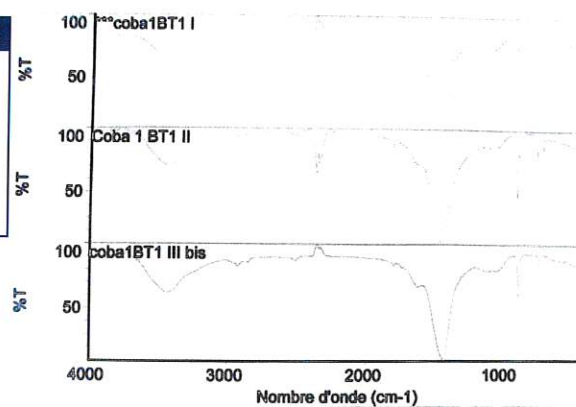
Notons que ces échantillons appartiennent à une même région, Yucatán - Campêche, territoire riche en mines d'argiles (Sacalum et Ticul se trouvent dans la

région du Yucatán). Ils correspondent également à la même période historique : l'époque Classique.

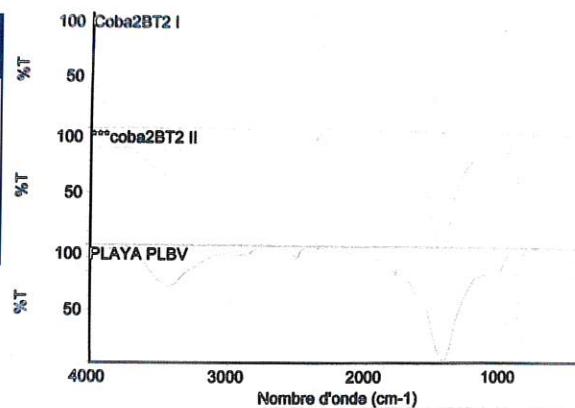
Les argiles utilisées par les mayas n'étaient pas chimiquement pures, aussi trouve-t-on des traces de carbonates souvent associés. Cela expliquerait la présence des bandes à 1440 et 712  $\text{cm}^{-1}$  de l'échantillon 6.

➤ Absence de la bande d'absorption à 1030  $\text{cm}^{-1}$

8 COBA 1 BT1 I	9 COBA 1 BT1 II	10 COBA 1 BT1 III
3430.82	3433.38	3432.02
1441.52	1442.01	1797.79
1034.42		1428.28
873.78	873.31	873.88
712.08	712.60	712



11 COBA 2 BT2 I	12 La pasadite COBA 2 BT2 II	7 PLAYA PLBV
3418.912361.45	3446.88	3430.54
1795.70		1798.17
1448.63	1429.36	1423.98
	1009.24	
873.61	876.12	873.55
712.26	712.15	711.33



Pour ces 6 échantillons : 7, 8, 9, 10, 11 et 12, la bande des silicates est inexistante. Avec les éléments dont nous disposons, nous ne pouvons affirmer la présence d'une argile constitutive (palygorskites) du bleu maya.

De plus, les échantillons 6, 8, 9, 11 contiennent des carbonates inorganiques décelés par la présence d'une bande à 1440  $\text{cm}^{-1}$ . Notons que ces quatre échantillons ont tous la même provenance, la région de Quintana Roo, et une époque différente de celle des 6 précédents.



Nous voyons ici s'esquisser des variantes régionales et chronologiques quand à l'utilisation des matériaux pour la fabrication du bleu maya.

Epoque	n°	Matériaux couche colorée		Localisation
Classique terminal	1	Argile		Campêche
	2			
	3			
	4			Yucatán
	5			
	6			
	11	Pas d'argile	Carbonates Pas carbonates	Quintana Roo Guatemala
	12			
Postclassique	7	Pas d'argile	Carbonates	Quintana Roo
	8			
	9			
	10			

Tableau XV : Synthèse des résultats obtenus par FTIR

### 3. Synthèse

#### EVOLUTIONS

A partir de la fin du classique il semble que l'argile n'est pas utilisée de manière systématique pour la fabrication du bleu maya. Cela est à mettre en relation avec le fait que les régions de l'aire maya sont différentes au cours de l'époque classique (Guatemala, Yucatán, Campêche, Quintana Roo). Les ressources minérales pouvaient varier. Les échantillons 11 et 12 ne contiennent pas d'argiles, nous notons des différences de compositions des bleus mayas par rapport à la présence ou à l'absence de carbonates, ce qui correspond clairement à des spécificités régionales.

**En résumé**, nous pouvons classer nos bleus mayas en deux groupes principaux : ceux qui contiennent des argiles et ceux qui n'en contiennent pas. Mise à part pour l'échantillon 12, ces deux groupes correspondent à deux régions différentes : le premier au **Basses terres du nord** et le second à la **Côte orientale**.

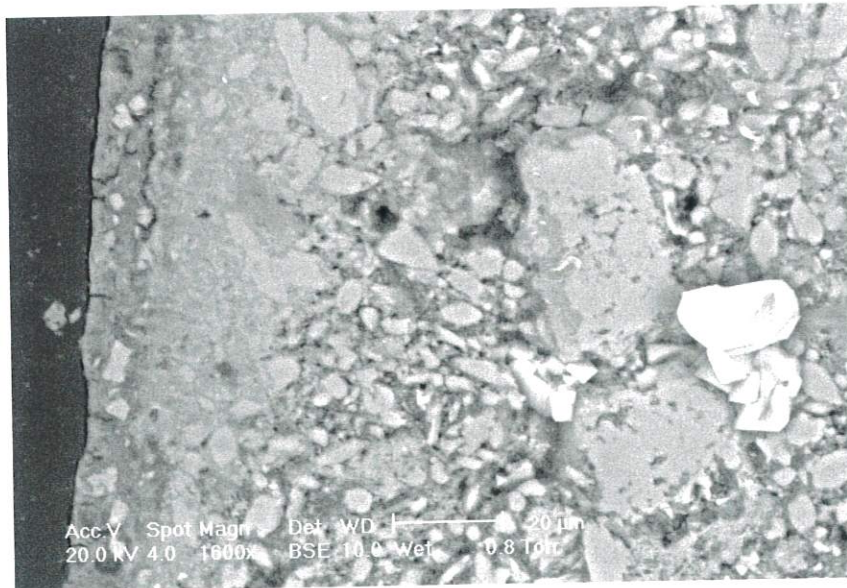
Déjà nous avons pu remarquer une évolution des techniques picturales et de la nature de l'enduit entre ces deux régions et périodes. Ici ces différences se confirment.



## 2 Microscopie électronique à balayage

Parmi les douze échantillons déjà analysés en infrarouge nous en avons sélectionné cinq pour observation au MEB et micro analyse EDX : cinq échantillons de même époque (classique), dont la couche picturale diffère.

### 1 ICHMAC

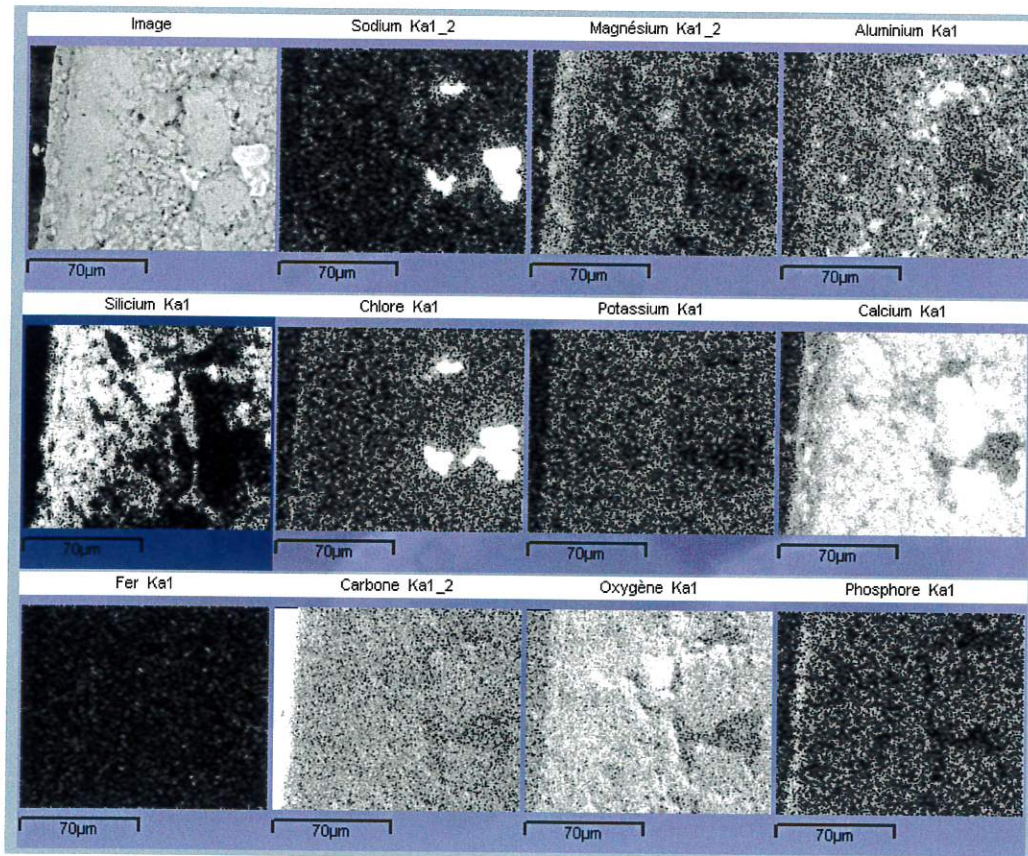


*ICHMAC 1 – Zone typique sur coupe. Image en électrons rétrodiffusés.  
La couche picturale est à gauche. La barre donne l'échelle.*

Sur les images réalisées à partir de la détection des électrons rétrodiffusés, les éléments de masse atomique élevée apparaissent clair, et ceux de masse atomique plus faible (C, O, c'est-à-dire de la matière organique ou du vide) en foncé.

On retrouve bien, dans cette zone typique, la stratigraphie déjà observée dans les enduits mayas. De la droite vers la gauche, on voit l'enduit grossier, formé de blocs et de petits grains. Puis vient une couche plus homogène, l'enduit fin, lui-même surmonté par la couche picturale.

La figure suivante nous aidera à l'interprétation. Elle associe onze cartes de répartition élémentaires (Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Fe, C, O et P) réalisés sur cette même aire, dont l'image est aussi représentée en premier. Le contraste de chaque figure est réglé de façon à assurer sa lisibilité maximum. On ne peut donc en déduire à la simple vue, les concentrations. Pour ce faire, on aura recours aux données correspondantes, enregistrées sur l'ordinateur du système.

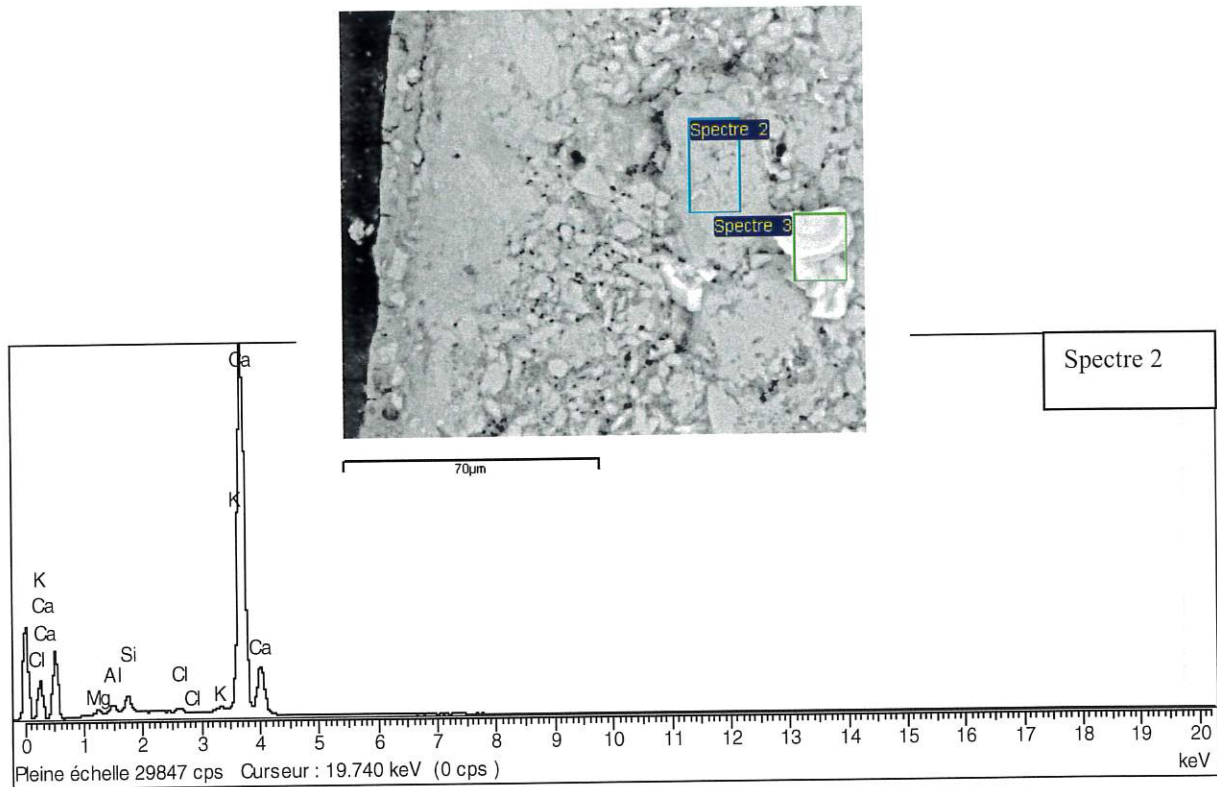


Comme le montrent les cartes en carbone, oxygène et calcium, les deux enduits sont à base de carbonate de calcium. La présence de quelques formes rhomboédriques indiquerait la calcite broyée. La présence de silicium (associé ni à l'aluminium, ni au magnésium) et d'oxygène dans l'enduit fin pourrait indiquer la présence de silice. Mais il s'agit plus probablement de sables *sascab*, sables silico-calcitiques presque toujours associés aux palygorskites, qui étaient couramment mélangés à la chaux dans les techniques traditionnelles méso-américaines. Selon Magaloni, les blocs informes plus importants correspondraient à la réutilisation de morceaux de chaux éteinte ou calcite comme charge.

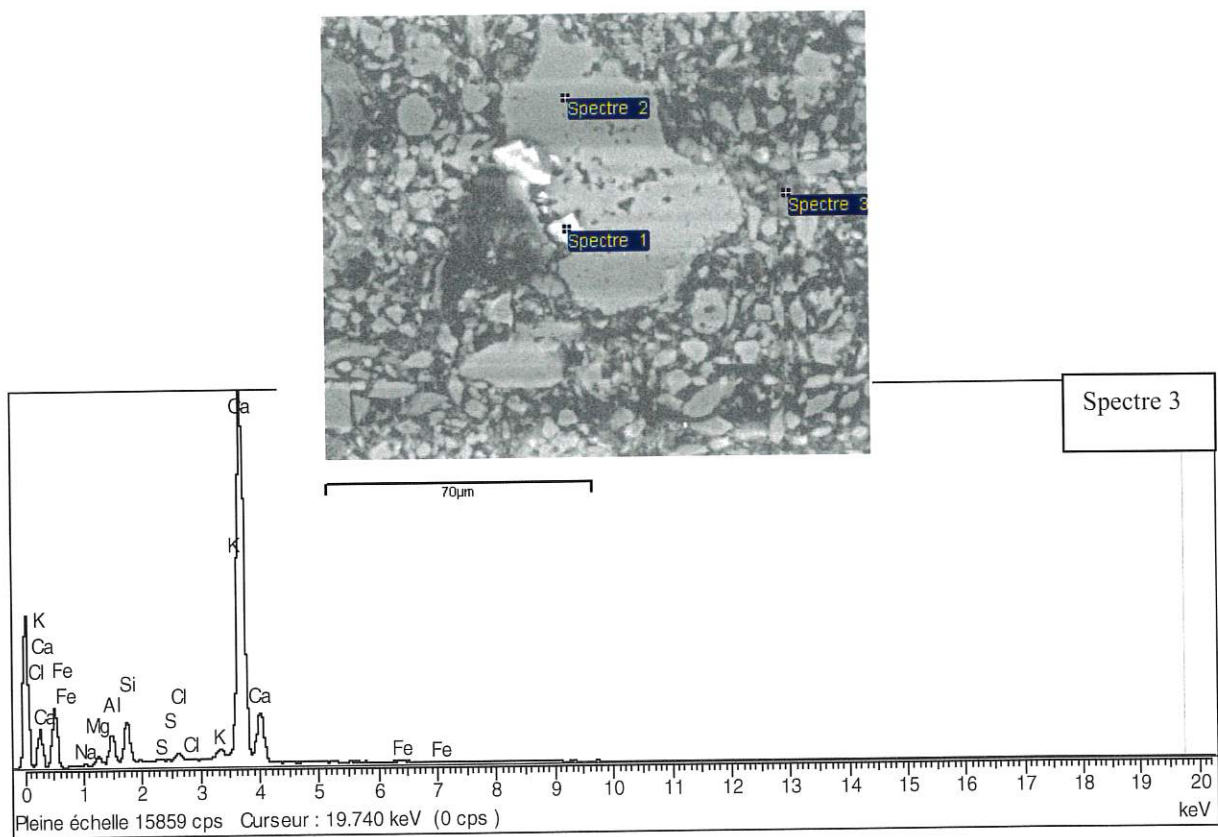
D'après la carte X ci-contre, la forme « en coquillage » blanche est formée de chlorure de sodium NaCl.

## Détermination des compositions élémentaires

### **1. Enduit grossier**



*Spectre EDX réalisé sur les blocs informes de l'enduit grossier.*



*Spectre EDX réalisé sur une aire étendue dans la zone contenant le sascab.*

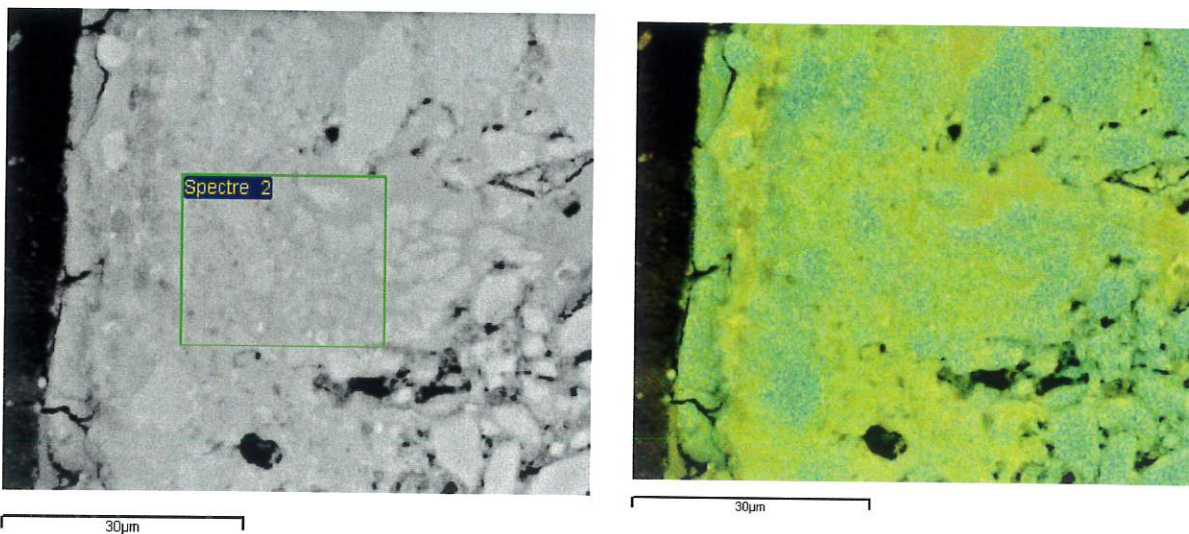
## Résultats quantitatifs (% atomiques)

			Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
Spectre 2				1	1,3	2,7	0,6	0,6	93,8
Spectre 3			0,5	1,6	4,5	6,3	1,3	1,5	83,3
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
Spectre 2	12,7	45,6		0,4	0,5	1,1	0,3	0,3	39
Spectre 3	15	39,6	0,2	0,7	2	2,8	0,6	0,7	38

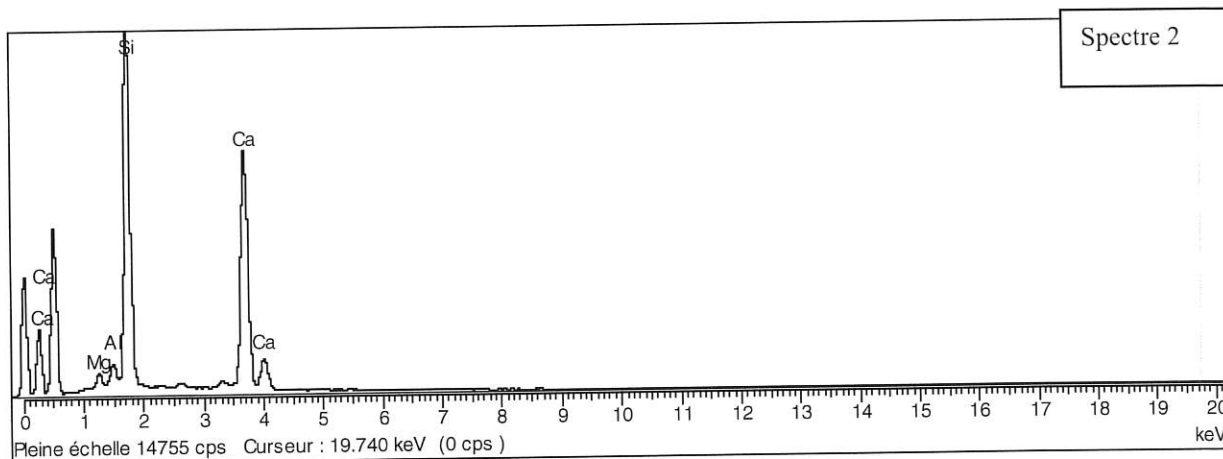
En dépit de la difficulté qu'il y a à effectuer le calcul des concentrations à la fois pour les éléments légers et pour les autres plus lourds, difficulté dont nous avons déjà parlé, ces résultats montrent que le carbonate de calcium (vraisemblablement la calcite) constitue environ 95% du nombre des atomes présents. Le faible comptage du carbone ne milite pas en la faveur de la présence d'un liant organique. La faible proportion de magnésium indique aussi que la chaux n'a pas été préparée à partir d'un carbonate double de calcium et de magnésium comme la dolomite.

## 2. Enduit fin

### Détermination des compositions élémentaires



*Superposition des cartes de répartition du Ca (vert) et du Si (orangé) sur l'image MEB.*



*Spectre typique de l'enduit fin*

Les calculs donnent :

**Résultats quantitatifs** (% atomiques)

		<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Ca</b>
Spectre 2		2,7	2,7	51,6	43,0
	<b>C</b>				
Spectre 2	33,2	0,5	0,5	8,8	6,7

La forte proportion de carbone et oxygène par rapport aux métaux traduit la présence d'un liant organique, ce qui confirme nos observations au microscope optique. Rappelons que la littérature parle d'emploi d'une gomme végétale. Comment interpréter la remarquable concentration en silicium ? *Sascab* de granulométrie plus fine et argile ? Il est probable qu'il y a de la calcite, mais sa proportion ne dépasse pas 35 % des atomes présents.

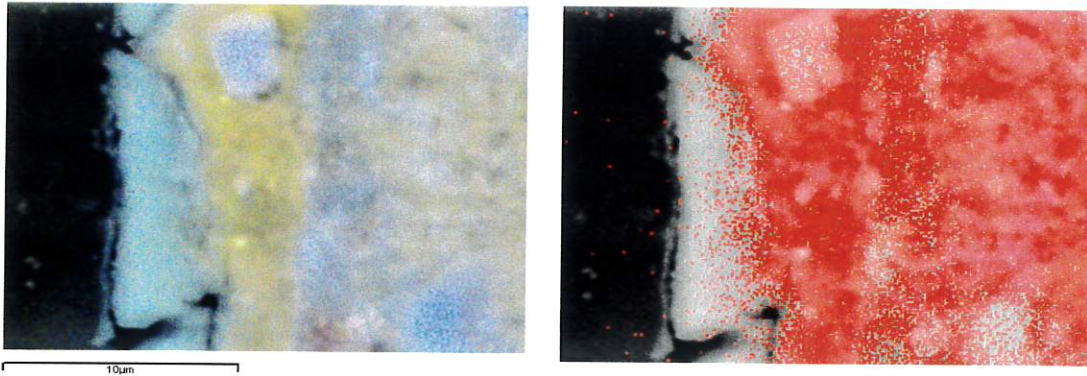
Les spectres réalisés juste en dessous de la couche picturale sont franchement différents : moins de calcium et plus de magnésium. Et surtout, le phosphore apparaît.

**Résultats quantitatifs** (% atomiques)

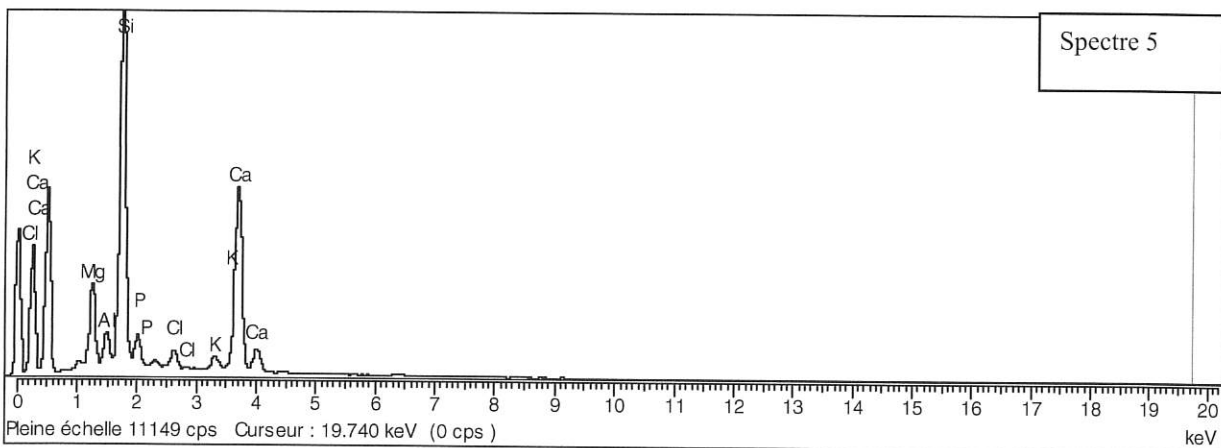
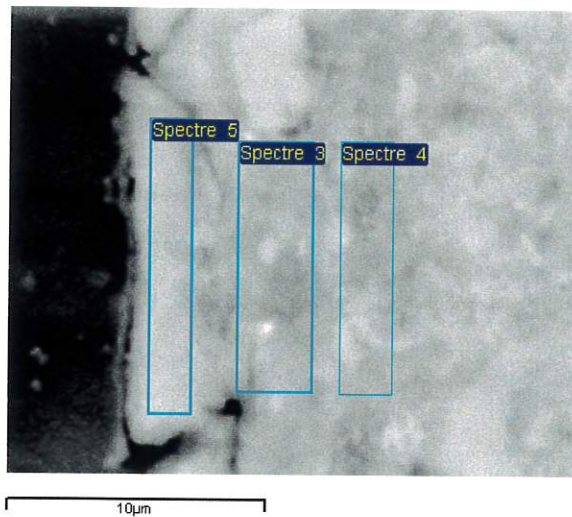
		<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Ca</b>	<b>P</b>
Spectre 3		8,72	3,06	54,6	27,24	6,38
	<b>C</b>					
Spectre 3	30,63	3,03	1,84	15,7	7,1	0,5

### 3. Couche picturale

#### Détermination des compositions élémentaires



*A droite, superposition de la carte de répartition du silicium et de l'image MEB. A gauche, superposition des cartes du calcium (bleu) et du silicium (jaune) et de l'image MEB.*



*EDX - Couche peinte bleue*



### Résultats quantitatifs (% atomiques)

Spectre 3			<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>Cl</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>
			9,4	3,2	39,8	6,0	3,3	2,2	36,2
Spectre 3	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>Cl</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>
	34,2	39,5	3	0,9	10,7	1,2	0,8	0,5	9,2

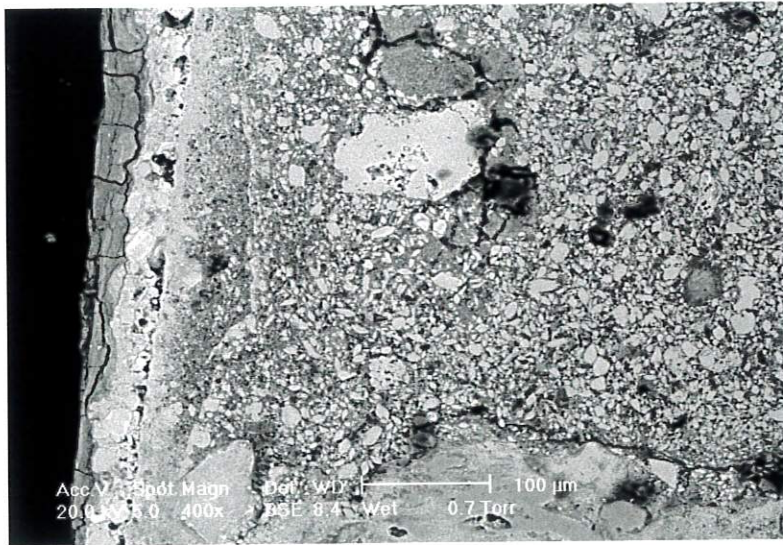
Une fois encore le liant organique est présent. La couche picturale (épaisseur 10  $\mu\text{m}$ ) contient elle aussi une proportion notable de silicium, mais moins que celle de l'enduit fin. Notons la présence de Mg en quantité plus importante que dans les autres couches. L'aluminium est présent aussi, mais en quantité moindre. La couche picturale est riche en calcium (calcite). En raison de la présence du silicium comme élément majoritaire, de Mg et de Al en faible quantité, on peut penser que la couche picturale est constituée d'argile ce qui est tout à fait conforme avec l'identification d'attapulgite par IRTF.

Comme nous l'avons vu, la présence du phosphore dans la couche peinte pourrait traduire l'emploi de bloc d'indigo dans la fabrication du bleu maya.



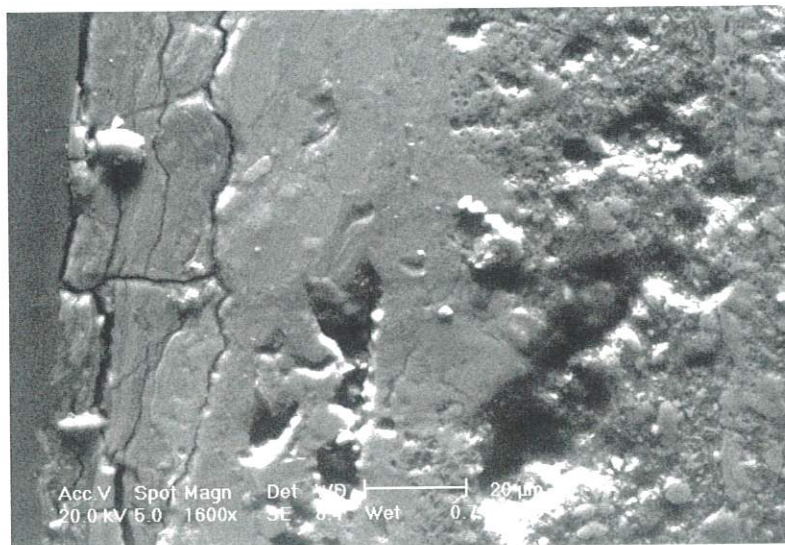
### 3 ICHMAC

Rappelons qu'il s'agit d'une superposition de bleu sur du jaune.



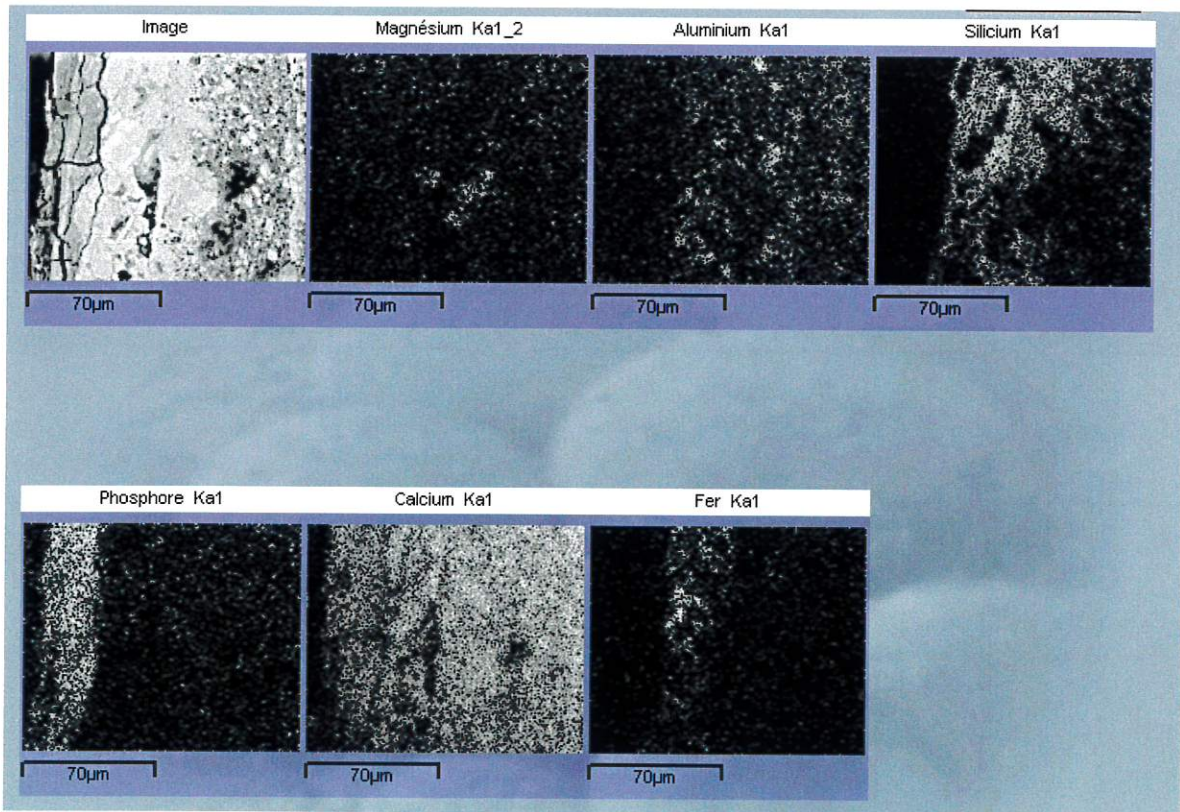
*ICHMAC 3 – Zone typique sur coupe. Image en électrons rétrodiffusés.  
La superposition des deux couches picturales est clairement visible (à gauche).  
Elles reposent sur un enduit fin reposant lui-même sur un enduit grossier.*

Nous retrouvons sur cette photo les caractéristiques de l'enduit grossier observé sur l'échantillon précédent : des grains de *sascab* mélangés à des morceaux de calcite comme charge.



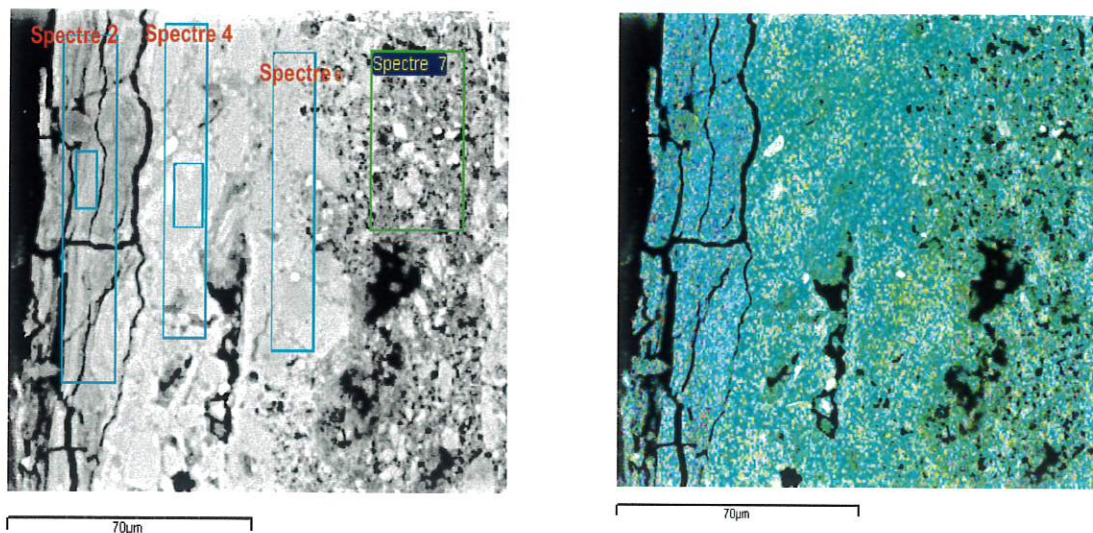
*Détail de la couche picturale. Image en électrons secondaires. De droite à gauche, enduit fin (rugueux), couche jaune (très lisse avec trous) et, après la fissure, couche bleue.*

L'image topographique montre que la surface de la coupe de la couche picturale est lisse, ce qui est révélateur de la présence de matière organique (ici, le liant).

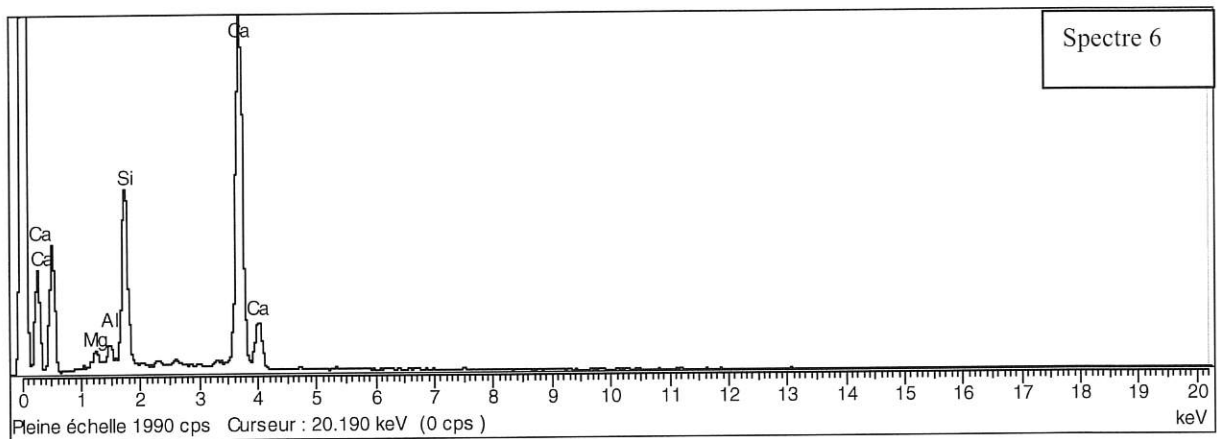


Les cartographies X montre que si toutes les couches possèdent du calcium, la couche bleue se distingue par le phosphore et la jaune par le fer, le silicium et l'aluminium.

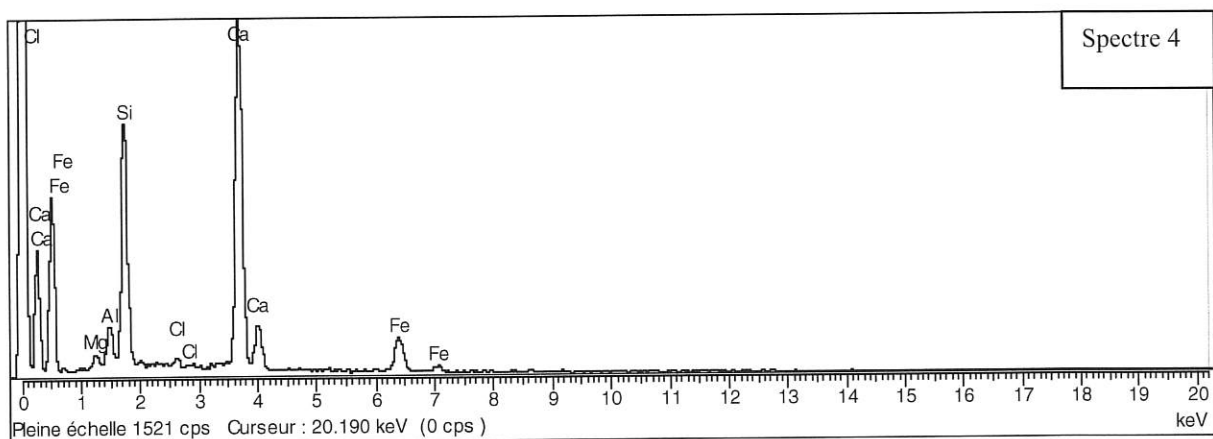
### Détermination des compositions élémentaires



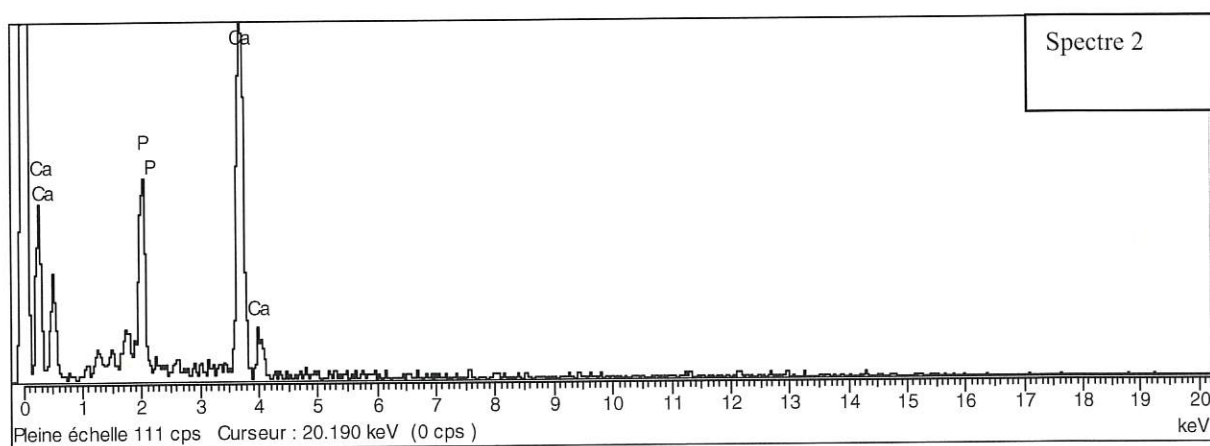
*Superposition des cartes de répartition du Ca (bleu) et du Si (jaune) sur l'image MEB.*



*EDX – Spectre typique sur l'enduit fin blanc*



*EDX – Spectre typique sur la couche jaune*



*EDX - Spectre typique obtenu sur la couche bleue.*

Les spectres typiques des enduits grossiers de cet échantillon et de ceux qui suivent, sont similaires à ICHMAC 1. Aussi nous ne présenterons que les données correspondantes aux enduits fins.

### Résultats quantitatifs (% atomiques)

	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectre 2 « bleu »	3,6	2,8	6,0	24,4	1,5	0,7	0,2	60,4	0,5
Spectre 4 « jaune »	0,3	3,1	21,3	1,9	-	0,9	-	59,0	14,4
Sp. 6 « enduit fin »	2,2	4,4	20,2	0,2	0,9	0,7	0,2	70,7	0,6

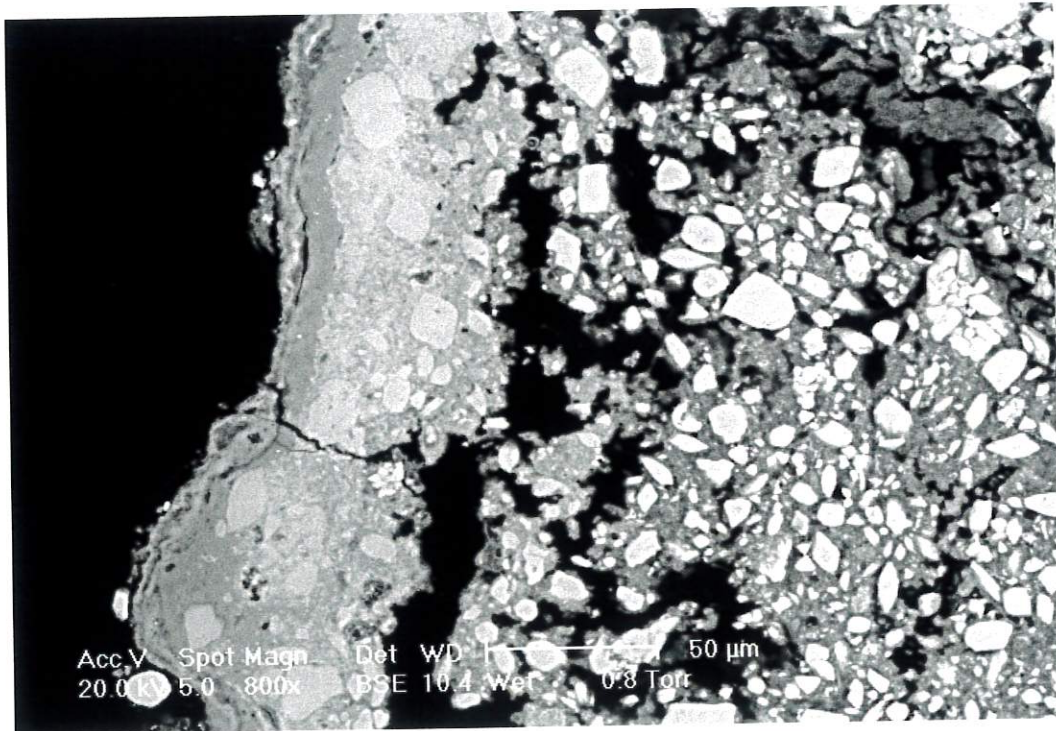
  

	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectre 2 « bleu »	57,0	31,3	0,4	0,3	0,7	2,8	0,2	0,1	-	7,2	0,1
Spectre 4 « jaune »	42,9	41,8	0,1	0,5	3,1	0,3	-	0,1	-	9,3	2,3
Sp. 6 « enduit fin »	50,9	37,4	0,3	0,5	2,3	0,0	0,1	0,1	-	8,4	0,1

Dans les trois couches, on note une forte composante organique. Dans les trois couches, la teneur en calcium (calcite<sup>4</sup> ?) est quasi identique, ce qui laisse pour la couche bleue 50% de carbone organique, pour la jaune 34% et pour l'enduit fin 43%. Le bleu se distingue encore par sa teneur en phosphore. Les teneurs en aluminium, silicium et magnésium sont compatibles avec la présence d'une palygorskite qui, d'ailleurs a été mise en évidence par IRTF. Sa concentration semble faible. Le jaune se particularise par celle en fer et en silicium. On peut suspecter un mélange d'argile et de goethite de type ocre jaune. Ce qui n'interdit pas un ajout de colorant jaune.

<sup>4</sup> Curieusement, on ne voit pas la bande des carbonates en FTIR. Comment alors interpréter cette abondance du calcium ?

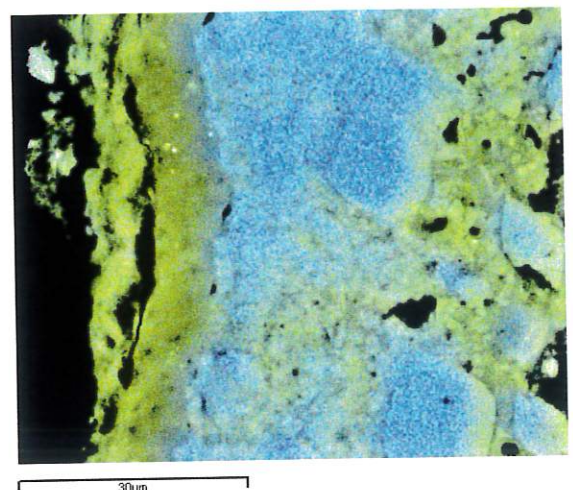
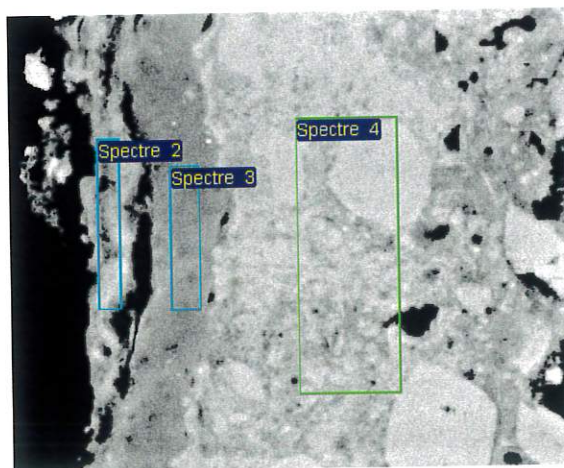
Rappelons que nous avons ici une superposition de deux couches bleues.



CHELEMI – Zone typique sur coupe. Image en électrons rétrodiffusés. Les deux couches peintes sont à gauche. La première peinture (bleu 1) en gris foncé, adhérente à l'enduit fin et d'épaisseur constante. La seconde (bleu 2) légèrement décollée et d'épaisseur très irrégulière.

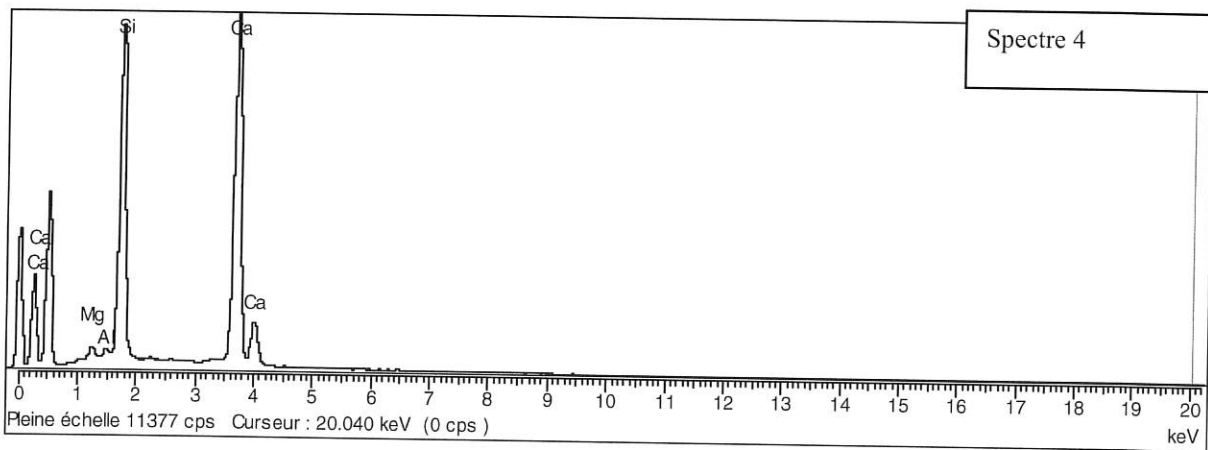
Nous retrouvons sur cette photo les caractéristiques des autres échantillons : utilisation de grains de sascab et de morceaux de calcite comme charge. Nous pouvons confirmer la présence de deux couches bleues posées sur un enduit de « finition » fin.

### Détermination des compositions élémentaires

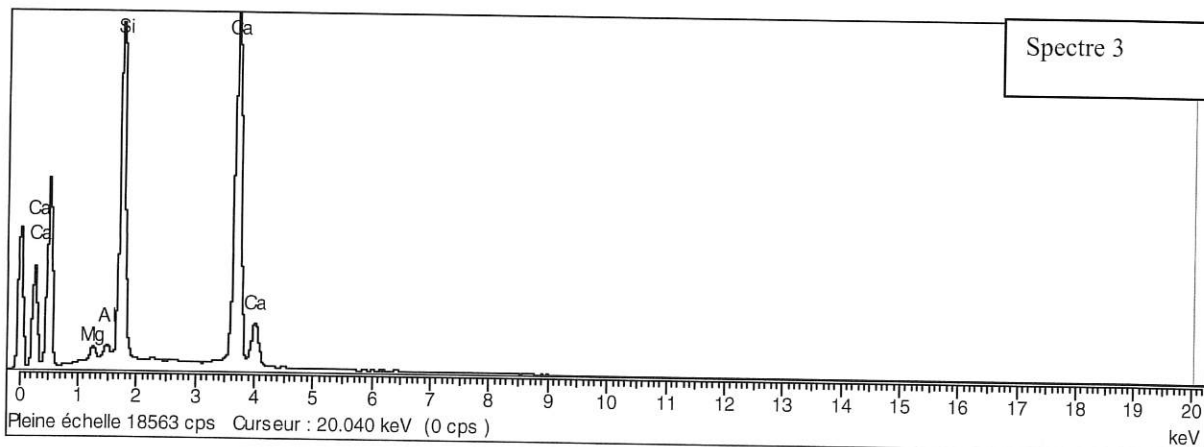


A gauche, détail de l'image MEB précédente avec délimitation des aires analysées. A droite, superposition des cartes de répartition du Ca (bleu) et du Si (vert clair) sur l'image précédente.

Dans la zone de la couche bleue 1, la teinte verte est plus foncée que dans la couche bleue 2 : le silicium est mélangé au calcium en quantité plus importante que dans la couche bleue 1. Dans l'enduit le mélange est moins homogène.

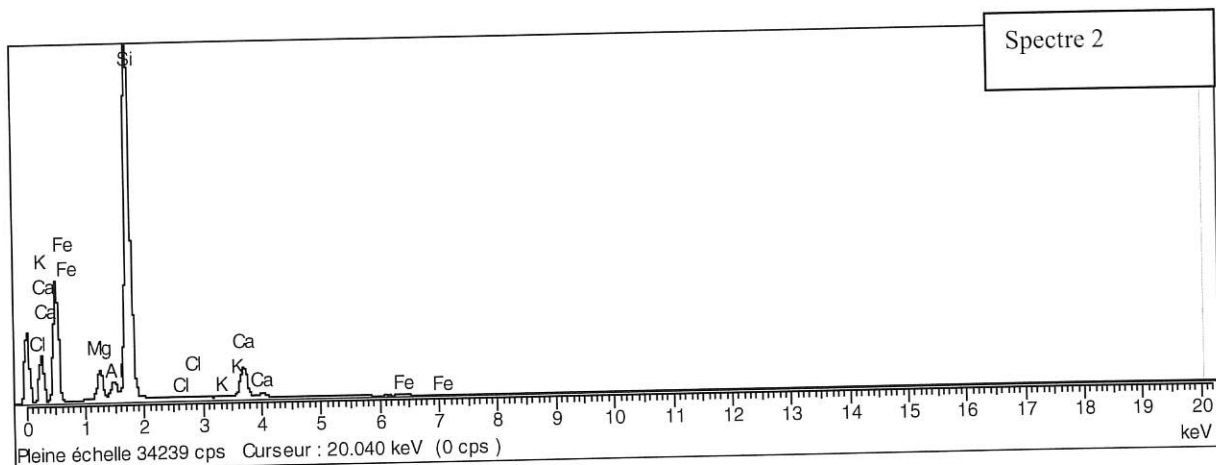


EDX - Spectre typique sur l'enduit fin



EDX - spectre typique sur la couche bleue 1





EDX - Spectre typique sur la couche bleue 2

**Résultats quantitatifs** (% atomiques)

	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
Spectre 2 « bleu 2 »	0,23	6,78	2,86	79,13	0,29	0,27	9,6	0,83
Spectre 3 « bleu 1 »	0,35	2,21	1,38	42,59	0,12	0,15	53,02	0,19
Spectre 4 « enduit fin »	0,46	2,06	0,83	42,79	0,19	0,14	53,47	0,07

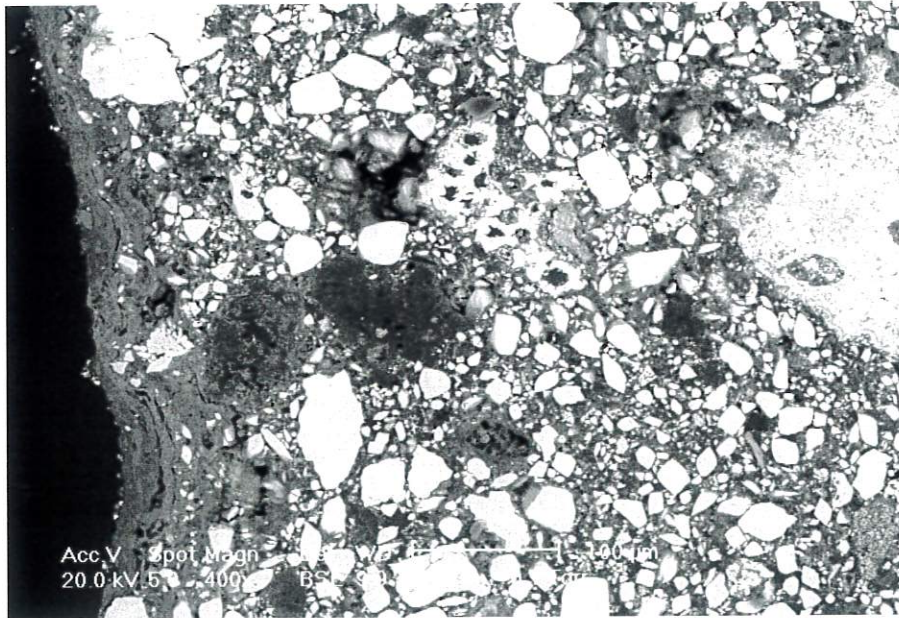
  

	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
Spectre 2 « bleu 2 »	42,82	42,41	0,04	1,25	0,46	11,66	0,03	0,03	1,18
Spectre 3 « bleu 1 »	35,23	49,55	0,06	0,36	0,22	6,66	0,02	0,02	7,85
Spectre 4 « enduit fin »	34,66	49,42	0,08	0,35	0,14	7,02	0,03	0,02	8,27

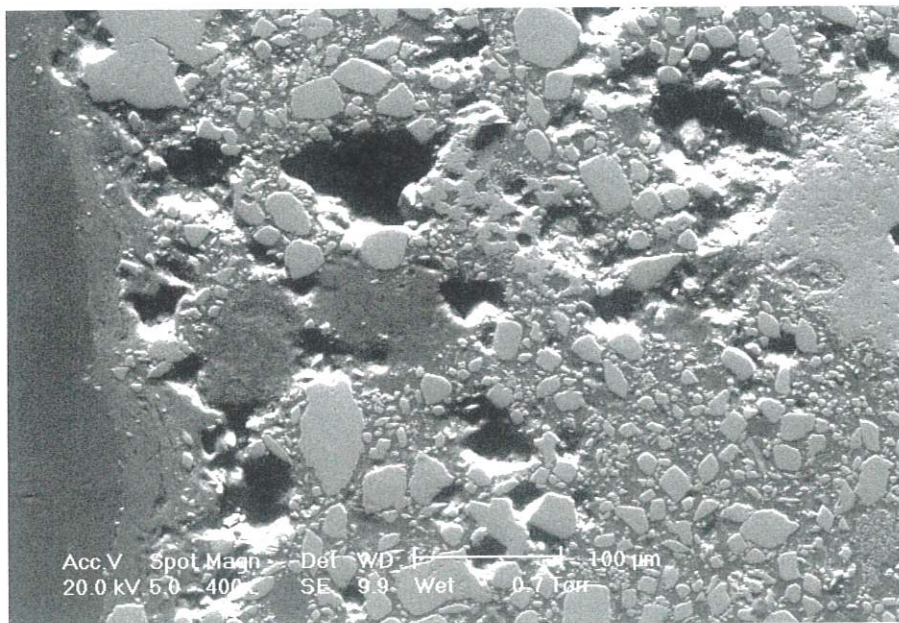
Surprise : la composition des deux couches bleues est différente. En revanche, la composition du bleu 1 est la même que celle de l'enduit fin. Tout se passe comme si on avait teint une fine couche d'enduit fin avec de l'indigo. D'autre part, ni le bleu 1, ni le bleu 2 ne contiennent de phosphore. Bleu 2 contient peu de calcium et une forte proportions des éléments présents dans l'attapulгите. Ce que confirme la IRTF. Un liant organique est présent dans les trois couches.



Rappelons qu'il y a ici superposition d'un bleu sur un rouge, lui-même sur un noir peint sur l'enduit. Ici il n'y a pas d'enduit fin. L'échantillon a été enrobé dans un polymère.

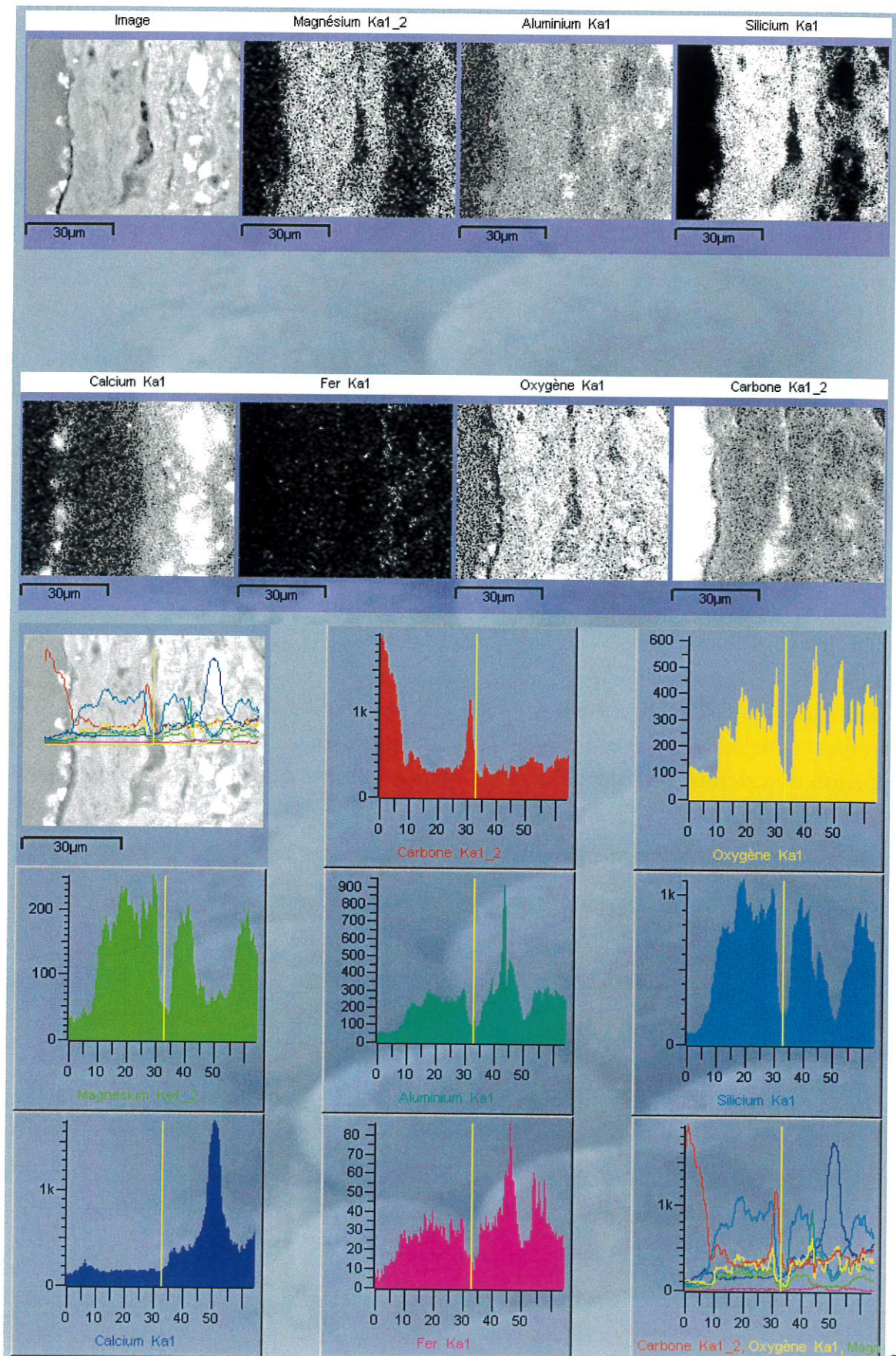


*DZIBILNOCAC – Zone typique sur coupe. Image en électrons rétrodiffusés. La couche picturale est à gauche. La barre donne l'échelle.*



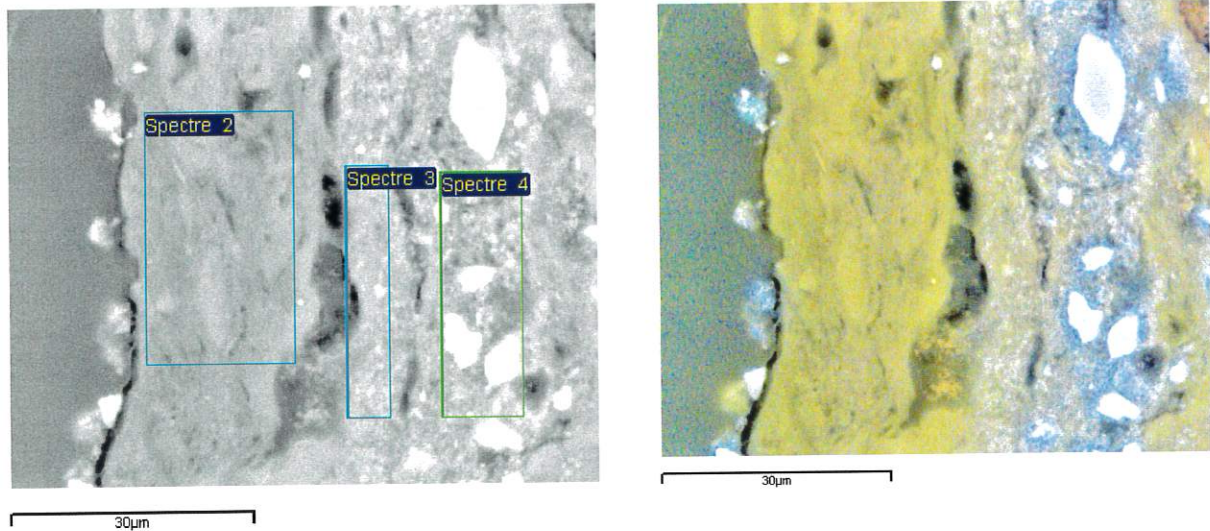
*DZIBILNOCAC – Même aire observée en électrons secondaires.*

L'enduit contient beaucoup plus de grains de calcite broyée que les précédents échantillons. Il y a assez peu de sascab. De plus sur l'image topographique, nous observons que l'enduit n'est pas très lisse comparée aux autres échantillons. Le liant organique est peut être présent en moindre quantité.



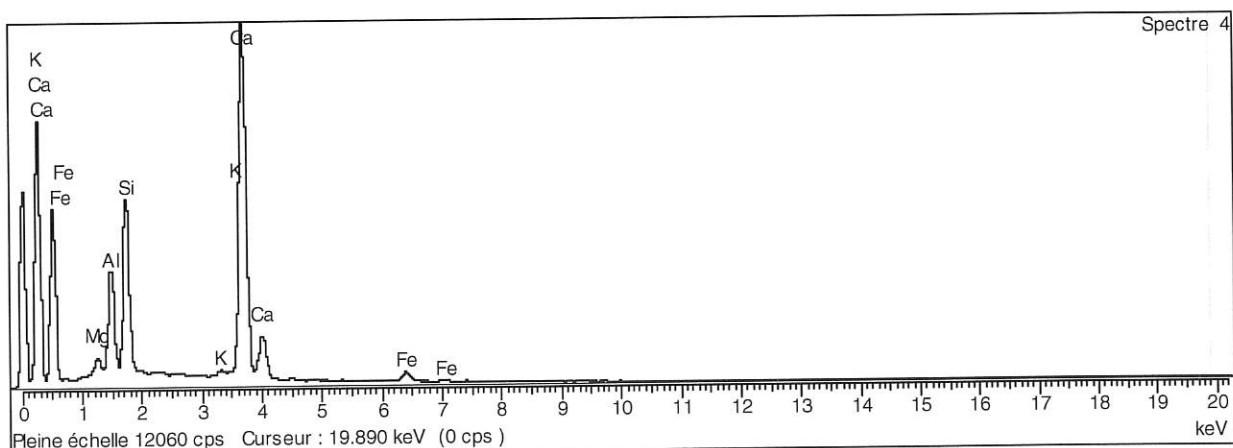
Sur les cartes de répartition, on observe que aluminium et oxygène sont également distribués. Calcium et silicium sont complémentaires. Magnésium et silicium sont superposables. On constate que la difficulté de différencier les trois couches peintes par leur composition élémentaire est extrême. C'est la raison pour laquelle nous effectuons des profils de concentrations à travers les couches.

### Détermination des compositions élémentaires

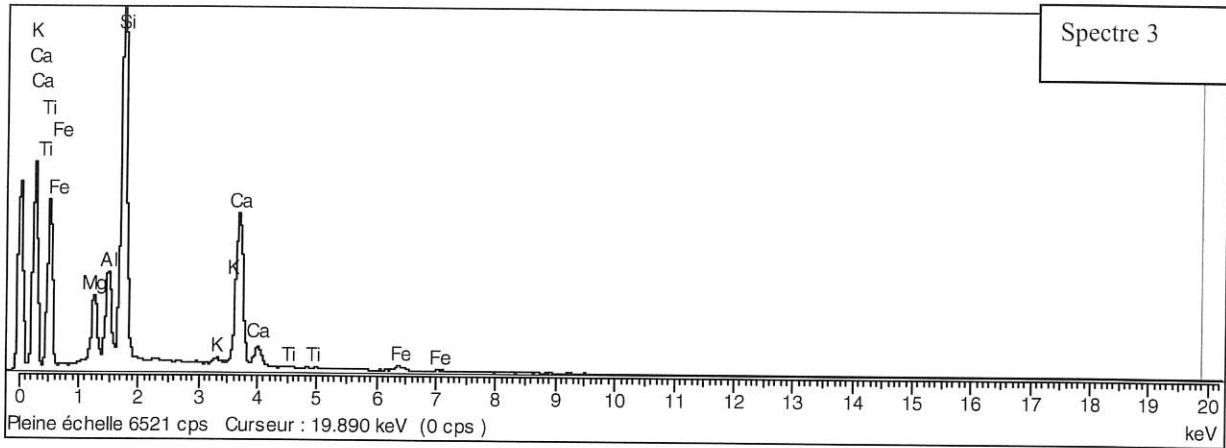


*A gauche, détail de l'aire précédente. A droite, superposition des cartes de répartition du Ca (bleu) et du Si (jaune) sur l'image MEB.*

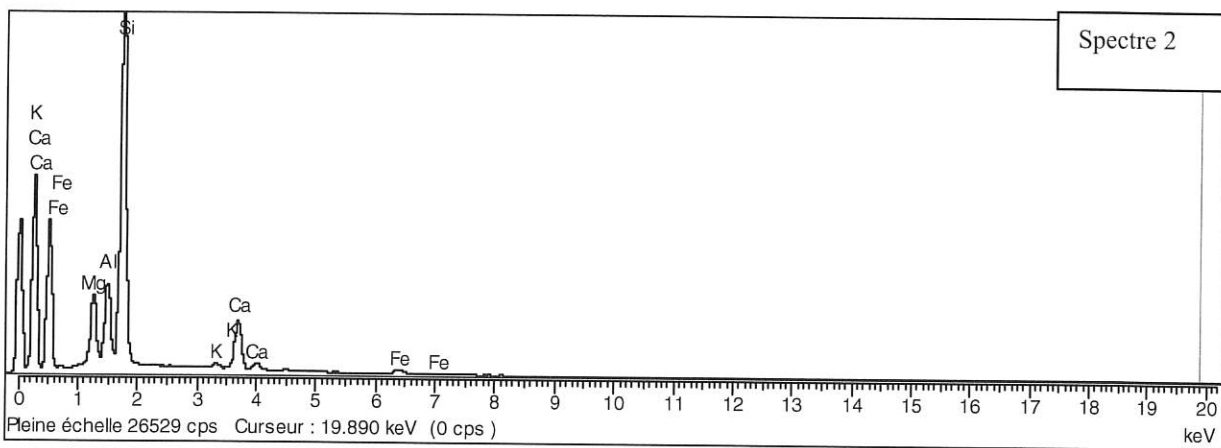
La carte de répartition du silicium et du calcium tend à faire remarquer que les différentes couches sont constituées d'un mélange de calcium et de silicium, la proportion de calcium diminuant vers la surface, comme nous l'avons observé pour l'échantillon précédent.



*EDX - spectre typique de l'enduit*



EDX – spectre typique sur la couche rouge



EDX - Spectre typique sue la couche bleue

### Résultats quantitatifs (% atomiques)

	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Fe
Spectre 2 « bleu »	11,4	12,2	62,4	0,4	0,1	0,8	10,2	1,7
Spectre 3 « rouge »	9,9	11,2	50,6	0,3	-	0,7	25,0	1,5
Spectre 4 « enduit fin »	2,9	14,1	25,7	0,3	0,1	0,5	52,9	2,7

	C	O	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Fe
Spectre 2 « bleu »	59,0	31,2	1,4	1,3	5,8	0,0	-	0,1	0,9	0,2
Spectre 3 « rouge »	55,1	33,9	1,3	1,3	5,4	0,0	-	0,1	2,7	0,2
Spectre 4 « enduit fin »	52,0	37,2	0,3	1,6	2,6	0,0	-	0,1	5,8	0,3

L'enduit est probablement un mélange de chaux et de charge type calcite et sascab en moindre quantité. La proportion de magnésium est faible par rapport à l'aluminium. On observe la forme orthorhombique de la calcite grossière broyée. Le pourcentage élevé de carbone et d'oxygène confirment la présence d'un liant organique.

La présence de fer en quantité importante à la frontière entre l'enduit et la couche picturale correspond à la couche noire. Il semble que ce soit un oxyde de fer.

La couche rouge n'est pas un pigment minéral de type ocre, c'est une argile et un colorant comme le bleu maya. Le pourcentage d'aluminium est quasi identique à celui du magnésium. Cette argile n'est pas une palygorskite. Il y a une proportion élevée de calcium, c'est peut être un mélange d'argile de carbonate de calcium. Un liant organique a été mis en évidence dans cette couche.

Le pigment bleu contient une argile qui semble être identique à celle du pigment rouge au vu des pourcentages atomiques. Pour cette couche l'argile utilisée est pure car la proportion de calcium est faible. Il y a présence d'un liant organique dans cette couche.

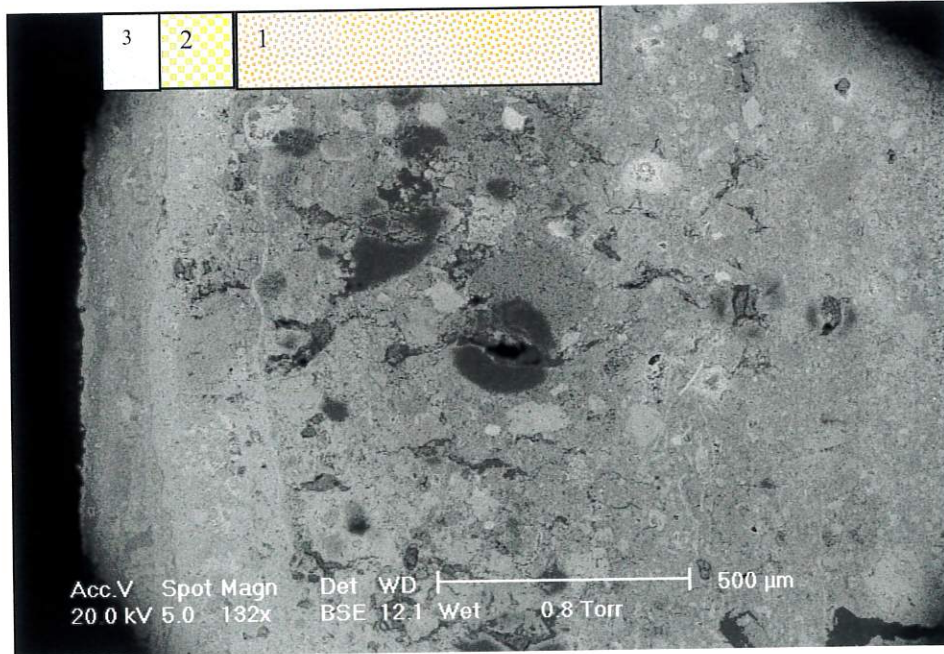
Les données obtenues en infrarouge et au MEB se corroborent. L'analyse confirme la présence d'une argile constitutive du bleu maya dont nous ne pouvons pas identifier la nature. Ce ne serait pas une palygorskite, d'ailleurs en infrarouge la bande intense à  $1030\text{ cm}^{-1}$  des palygorskites est absente. De même nous avons pu vérifier l'hypothèse de la présence d'un liant dans toutes les couches.





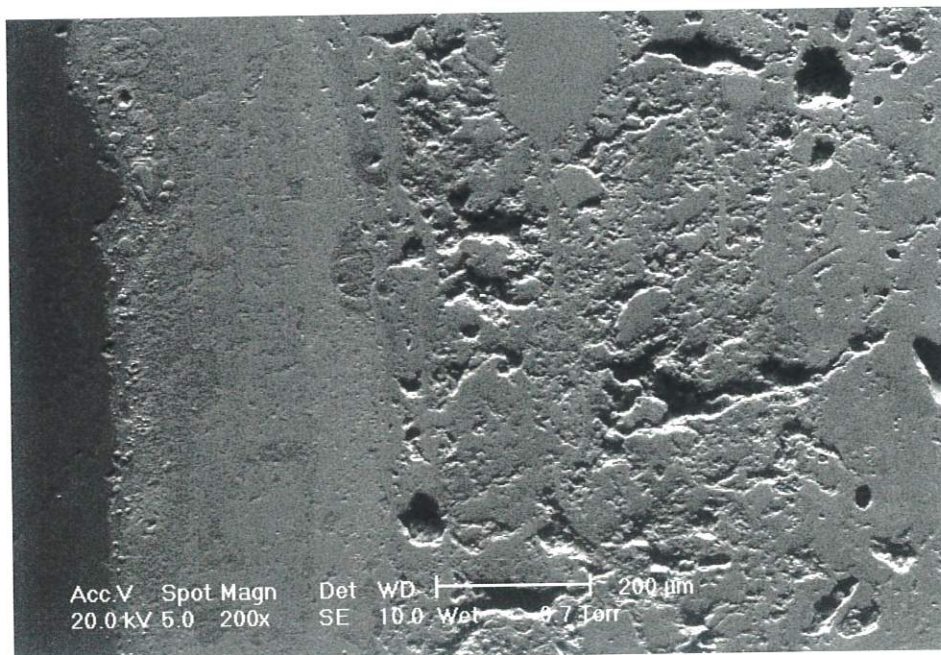
## 12 LA PASADITA

Il s'agit d'un échantillon à cinq couches : un beige peint sur un bleu, lui-même peint sur un vert reposant sur un blanc, celui-ci sur un rouge (un dessin préparatoire ?). Le tout au contact de l'enduit fin.



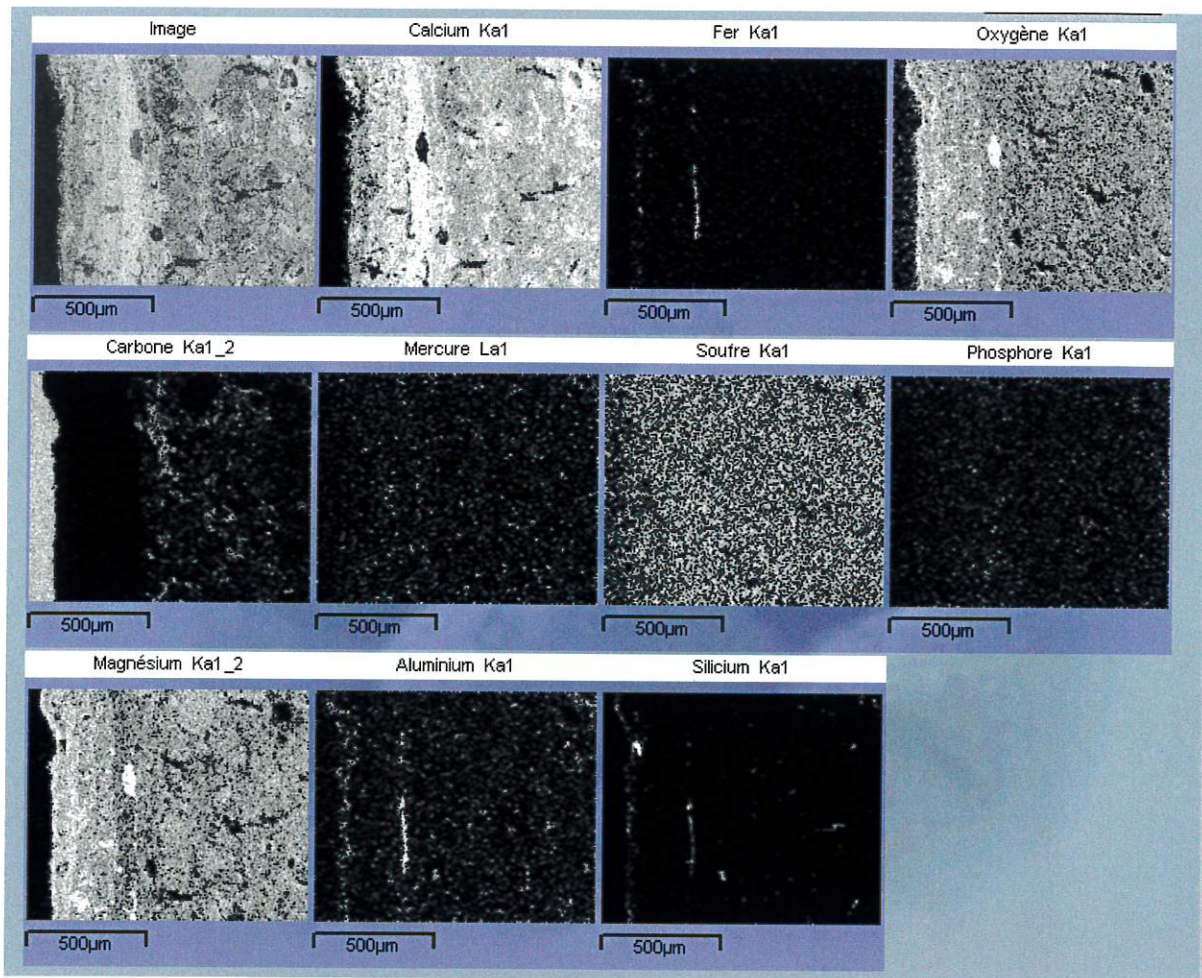
*LA PASADITA – Zone typique sur coupe. Image en électrons rétrodiffusés.  
La couche picturale est à gauche. La barre donne l'échelle.*

- 1 : enduit grossier
- 2 : enduit fin
- 3 : couche colorée

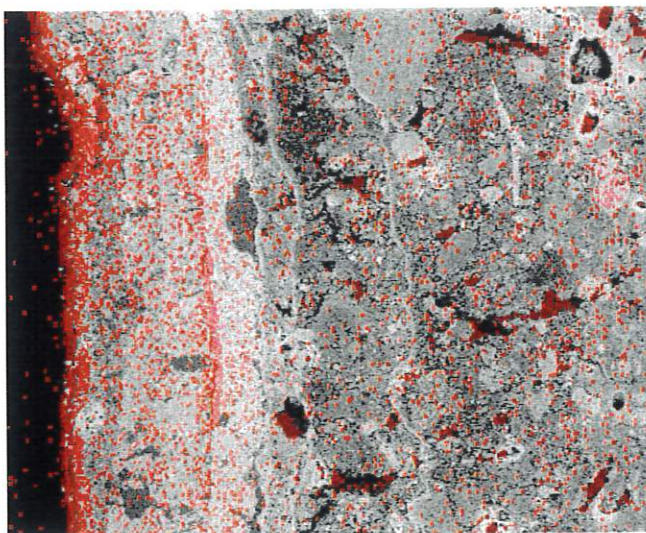


*Image topographique d'un détail de la même zone (couches peintes et enduit fin).*

Sur ces deux images en noir et blanc, la stratigraphie est peu lisible. Le poli de la coupe de la couche picturale est révélateur du fait que l'on se trouve en présence d'un matériau riche en matière organique. Ici nous ne voyons pas de problème de cohésion ou d'adhésion comme on a pu le voir dans les autres échantillons. Nous observons assez peu de grains de sascab ou de calcite broyée contrairement aux autres échantillons.

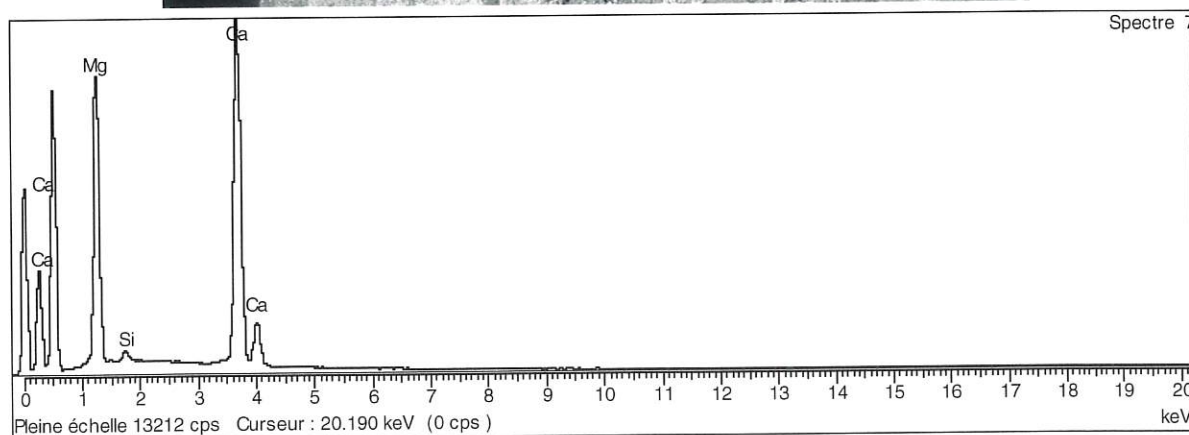
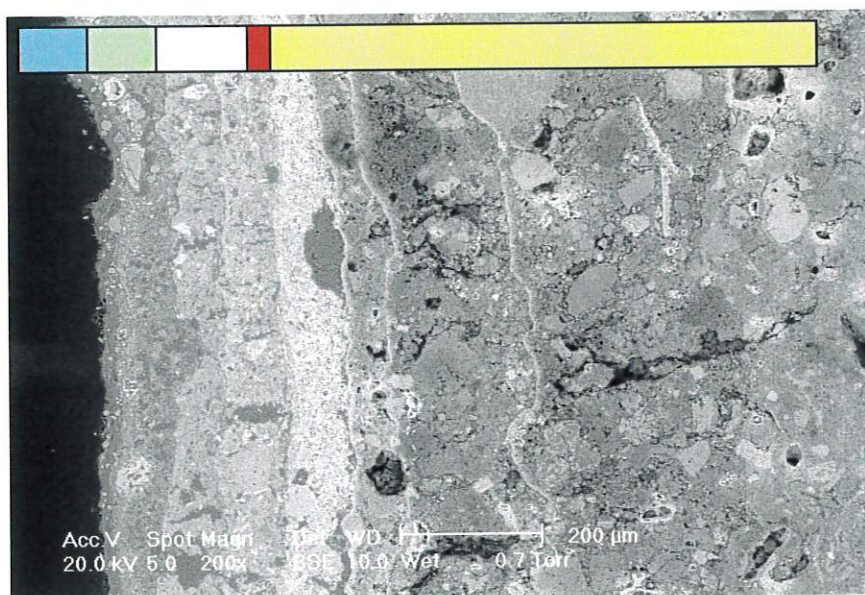


Les couches peintes se distinguent de l'enduit fin par leur richesse en calcium, magnésium et oxygène. Bizarrement, elles paraissent pauvres en carbone. Le beige paraît contenir plus d'aluminium et de silicium. Avec la rouge, elle contient du fer.

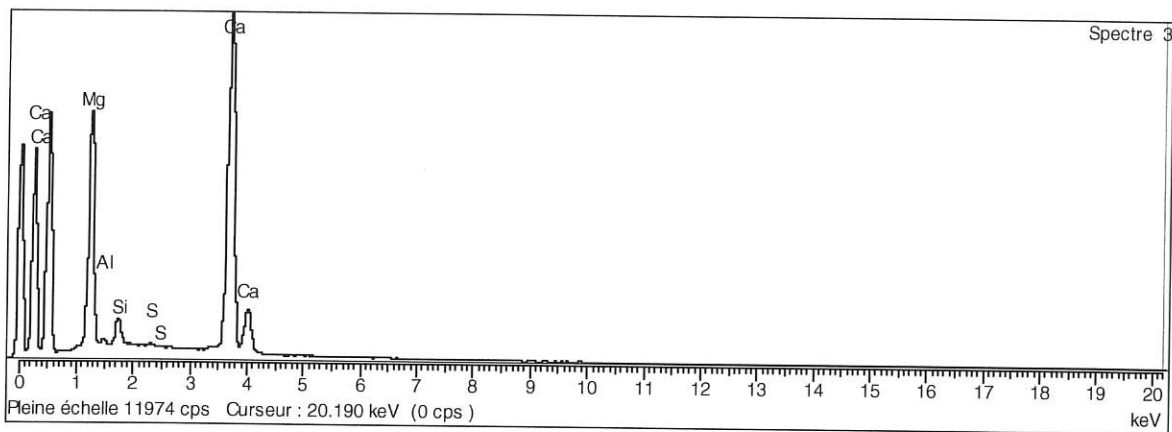


Superposition des cartes de répartition du Si (rouge) sur l'image MEB. Les surconcentrations de silicium dans les diverses couches peintes sont nettement visibles.

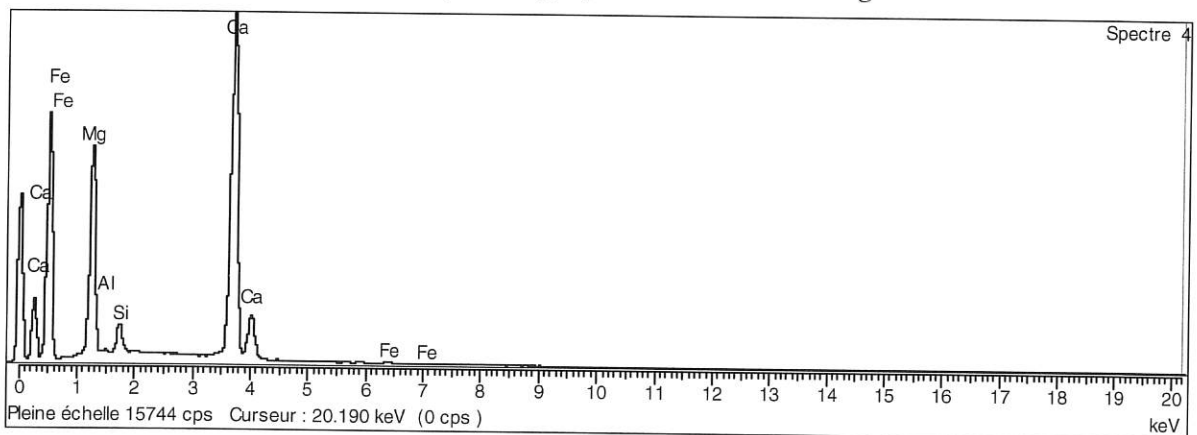
### Détermination des compositions élémentaires



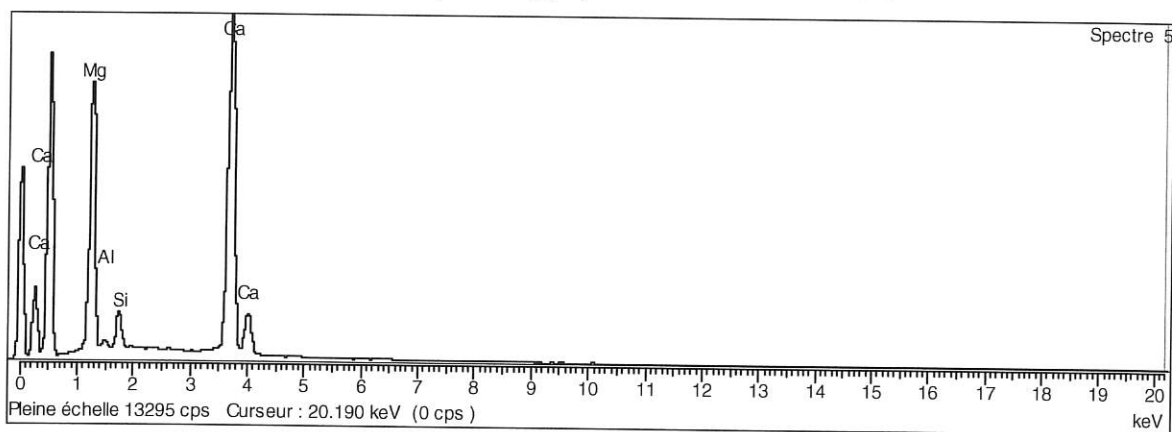
EDX - Spectre typique sur la couche d'enduit



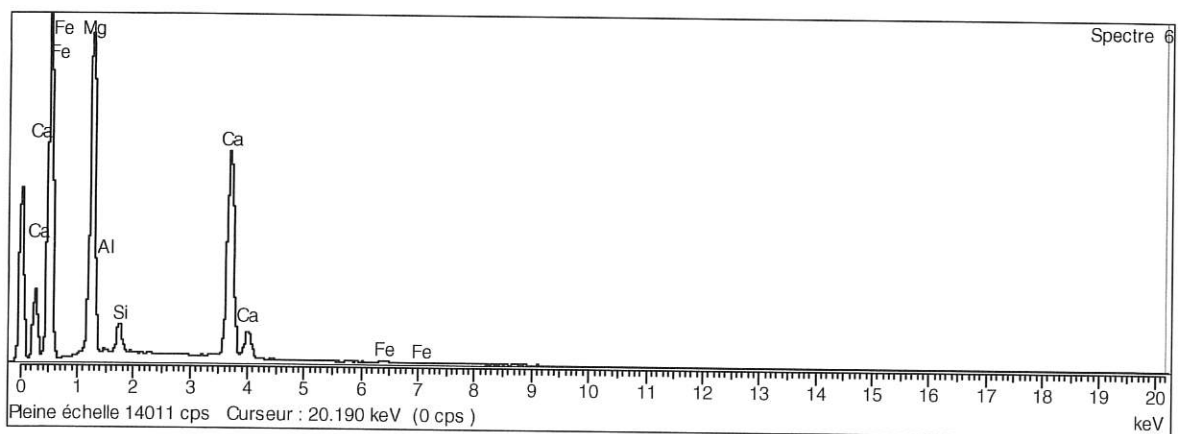
*EDX - Spectre typique sur la couche rouge*



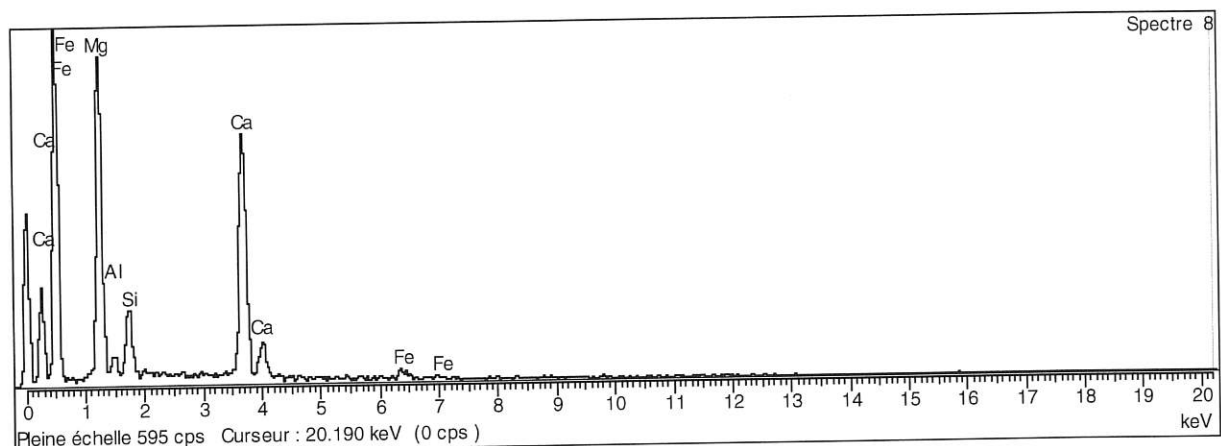
*EDX - Spectre typique sur la couche blanche*



*EDX - Spectre typique sur la couche verte*



*EDX - Spectre typique sur la couche bleue*



EDX - Spectre typique sur la couche beige

Tous ces spectres sont superposables. La partie minérale de ces couches peintes doit être identique.

De l'intérieur vers l'extérieur, la proportion de calcium diminue alors que celle de magnésium augmente. Dans toutes les couches le magnésium et le calcium sont majoritaires. L'échantillon 12 est le seul pour lequel la teneur en silicium soit si faible.

### Résultats quantitatifs (% atomiques)

	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe
enduit fin	48,2	0,5	1,6	0,1	0,2	49,4	-
rouge	42,0	1,0	4,6	0,2	0,4	51,5	0,2
blanc	39,4	0,7	5,1	0,2	0,1	54,2	0,3
vert	44,0	1,5	6,0	0,1	0,1	48,0	0,3
bleu	56,5	0,8	6,2	0,2	0,2	35,8	0,4
beige	46,9	4,3	11,0	0,7	0,2	34,9	2,0

	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe
Spectre enduit fin	27,8	56,7	8,0	0,1	0,2	0,0	0,0	17,4	0,0
Spectre rouge	41,6	46,5	5,3	0,1	0,5	0,0	0,0	7,0	0,0
Spectre blanc	21,8	61,5	7,1	0,1	0,7	0,0	0,0	9,8	0,0
Spectre vert	22,1	61,2	8,0	0,2	0,8	0,0	0,0	7,7	0,0
Spectre bleu	24,0	60,7	9,6	0,1	0,7	0,0	0,0	4,8	0,1
Spectre beige	28,0	57,2	7,9	0,5	1,3	0,1	0,0	4,7	0,3

Deux faits marquants : c'est la première fois que la teneur en magnésium atteint celle en calcium (usage de dolomite  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  ?). D'autre part, toutes ces compositions se ressemblent. Quelques différences sur le magnésium. Et du fer dans le beige (l'argile ?). Le second tableau montre que, pour les teneurs en carbone, le rouge se distingue nettement. Bleu et beige montrent un bas taux de calcium.

Y a-t-il de la dolomite ? Si l'on en a, et qu'elle soit utilisée quasi pure, on doit trouver :

- 1) Pour un carbonate  $\text{O/C} = 3$ . En fait, l'étalonnage sur une calcite montre qu'avec cette technique, on trouve en réalité non pas 3, mais 2,7.
- 2) Pour une dolomite :  $\text{C} = \text{Ca} + \text{Mg}$ , soit  $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{C} = 1$ . L'étalonnage sur une calcite montre qu'avec cette technique, on trouve en réalité non pas 1, mais 0,9.
- 3) Pour une dolomite,  $\text{Ca/Mg} = 1$ .

Pour ces diverses couches peintes, nous trouvons :

	O/C	conclusion	Ca+Mg/C	Ca/Mg	conclusion
Valeur théorique dolomite	2,7	carbonate	0,9	1	dolomite
Enduit fin	2	liant + carbonate	0,55	0,9	dolomite
rouge	1,1	liant prédominant	0,27	1,1	dolomite présente
blanc	2,8	carbonate	0,72	1,2	dolomite presque pure
vert	2,8	carbonate	0,70	0,94	dolomite presque pure
bleu	2,5	carbonate	0,60	0,5	dolomite + sépiolite ?
beige	2	?	0,45	0,61	sépiolite ?

Les couches d'enduit, rouge, blanche, verte sont de même nature, elles contiennent toutes de la dolomite. La couche bleue ne contient pas de la dolomite pure, mais probablement une argile en plus. La forte proportion de magnésium, silicium et fer, nous fait émettre l'hypothèse d'une sépiolite.

Stratigraphie	Eléments présents	
<b>ENDUIT grossier</b>	Ca , Mg maj O, C Traces de Si	Le pourcentage atomique de l'enduit en Mg et Ca est quasi identique. Il n'y a pratiquement pas de Si. En regardant la cartographie nous voyons que tout ce qui est calcite contient du magnésium, c'est donc un minerai qui contient les deux, d'où l'affirmation de la dolomite : $MgCO_3 + CaCO_3$ . Cet enduit apparaît très organique. De plus les proportions relatives du carbone et de l'oxygène (1 pour 3) laissent à penser qu'il s'agit de carbonates. <b>Enduit de chaux dolomitique (<math>MgCO_3</math>) mélangé avec un liant organique.</b>
<b>ENDUIT fin</b>	Mg, Ca maj O,C	
<b>Couche Picturale rouge</b>	Trace Al, Fe, Si	La proportion de carbone et d'oxygène (plus de 40%) dans cette couche est égale ce qui laisse à penser que nous ne sommes pas en présence de carbonates mais plutôt d'un liant organique. Aucun élément révélateur (Fe, Hg, Pb) des pigments minéraux rouges n'apparaît ici. Il est vrai qu'il y a du fer mais le pourcentage est trop faible pour considérer que ce pigment soit une ocre. Ce qui tend à dire qu'il s'agit d'un pigment organique comme le bleu maya. De plus sa composition est similaire à celle des autres couches colorées en tout cas pour le vert et le blanc. <b>colorant organique rouge + charge : dolomite</b> Nous ne pouvons attester la présence d'une argile.
<b>Couche Picturale blanche</b>	Ca maj Mg	<b>dolomite</b>
<b>Couche Picturale verte</b>	Ca, Mg, O	Le pigment blanc et vert ont une composition très proche bien que le pourcentage atomique de silicium et aluminium soit plus important pour le vert. <b>colorant organique vert + charge : dolomite</b> Nous ne pouvons attester la présence d'une argile.
<b>Couche Picturale bleue</b>	Mg, O Trace Ca, Al, Si	Les proportions de carbone et d'oxygène nous font penser à un carbonate. Le pourcentage de Mg par rapport au Ca est très important : cette couche contient de la dolomite. Il y a présence de silicium et de fer. Peut-être est-ce une argile avec une grande quantité de magnésium et de fer (sépiolite?) qui a servi à fabriquer le bleu ; en tout cas ce n'est pas de la dolomite seule. <b>Dolomite + Argile + indigo</b>
<b>Couche Picturale beige</b>	Mg maj, O Trace Al, Si	Le spectre de cette couche est similaire à celui du bleu. Nous pensons donc à la même argile mais utilisée seule (sépiolite ?) <b>Argile</b>

Tableau XVI : Interprétation des résultats MEB pour l'échantillon La pasadita

Les données obtenues en infrarouge et au MEB se complètent. L'analyse infrarouge nous montrait l'absence de la bande à 1030cm<sup>-1</sup>. Il n'était alors pas possible d'affirmer la présence d'une argile constitutive du bleu maya. Le MEB nous confirme que le bleu n'est pas constitué principalement d'argile mais de dolomite (carbonate de magnésium). Peut-être est ce la raison pour laquelle nous ne pouvions déceler l'argile. La nature de celle ci est difficile à identifier à ce stade. Toutefois elle contient beaucoup de magnésium.

Nous avons pu vérifier l'hypothèse de la présence d'un liant dans toutes les couches.

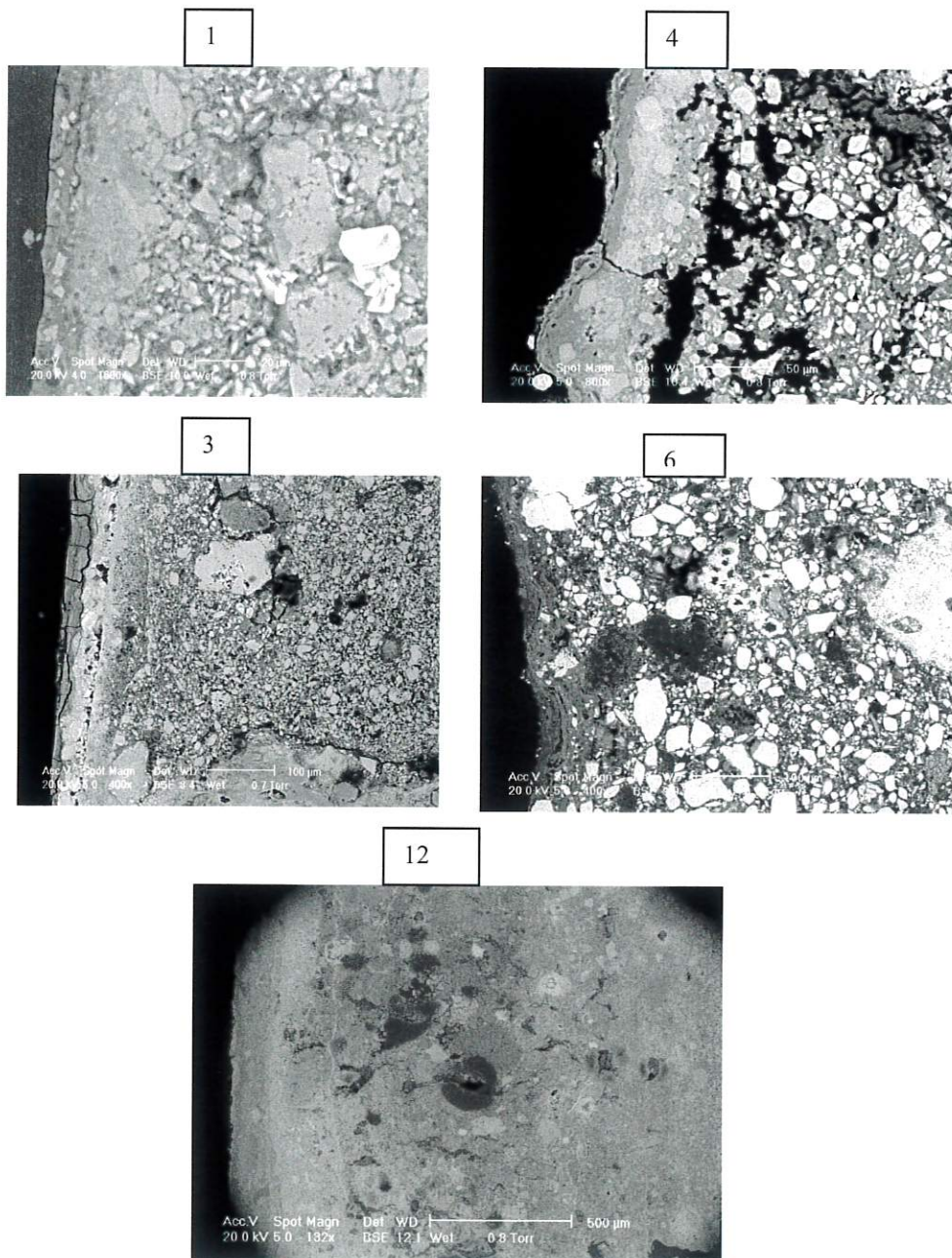




# 3

## Synthèse des résultats : les techniques picturales mayas

### 1) Images MEB, tableau récapitulatif des résultats EDX, IRTF



Echantillon	Enduit – résultat MEB	Couche picturale bleue – résultat MEB	Couche picturale bleue – résultat IRTF
1. ICHMAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Chaux calcitique</li> <li>Agrégats chaux éteinte</li> <li>Sascab</li> <li>Pas de liant</li> <li>➤ Argile pour enduit de finition (palygorskite)</li> <li>Liant</li> </ul>	Argile (palygorskite, sépiolite ?) Calcite minoritaire	palygorskite
3. ICHMAC	<i>Pour les deux enduits :</i>  Chaux calcitique Sascab Liant	Peu d'argile Liant	palygorskite
4. CHELEMI	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Chaux calcitique</li> <li>Sascab</li> <li>Liant</li> <li>➤ Argile pour enduit de finition</li> <li>Liant</li> </ul>	Argile (attapulgite) Liant	palygorskite
6. DZIBILNOCAC	Chaux calcitique Sascab Liant	Argile (pas une palygorskite)	Argile Carbonates
12. LA PASADITA	Chaux dolomitique Liant	Dolomite Argile (palygorskite)	Argile ? pas palygorskite Pas de carbonates ?

Tableau XVII : Synthèse des résultats d'analyses

## 2) Support et techniques

Les cinq échantillons étudiés permettent de déduire qu'il y a deux groupes techniques différents en fonction des matériaux mis en œuvre.

Le **premier groupe** est composé des échantillons ICHMAC, CHELEMI, DZIBILNOCAC. Les enduits sont réalisés à base de **chaux de type calcitique mélangée à de la calcite de réemploi, à du sascab (sable silico-calcaire) et à un liant organique.**

Le **deuxième groupe** est constitué de LA PASADITA au Guatemala. Il utilise une **chaux dolomitique mélangée à un peu de calcite de réemploi et à un liant organique utilisé en plus grande proportion.** Il n'y a pas de *sascab*.

Ces deux groupes contemporains appartiennent à des régions distinctes, où les ressources minérales sont différentes. La zone frontalière du Yucatán et du Campêche, où se situe le premier groupe, est principalement formée d'une croûte géologique de calcite et de *sascab*. On y trouve également un peu de dolomite. La zone du Chiapas/Guatemala où se situe La pasadita est principalement constituée de dolomite. Les argiles associées à chaque type de sol sont de nature différentes : dans un sol dolomitique, les argiles possèdent une grande proportion de magnésium comparée à celles provenant d'un sol de calcite pure. La montmorillonite et la sépiolite sont associées à un sol dolomitique alors que l'attapulgite et la kaolinite le sont plutôt à un sol calcitique.

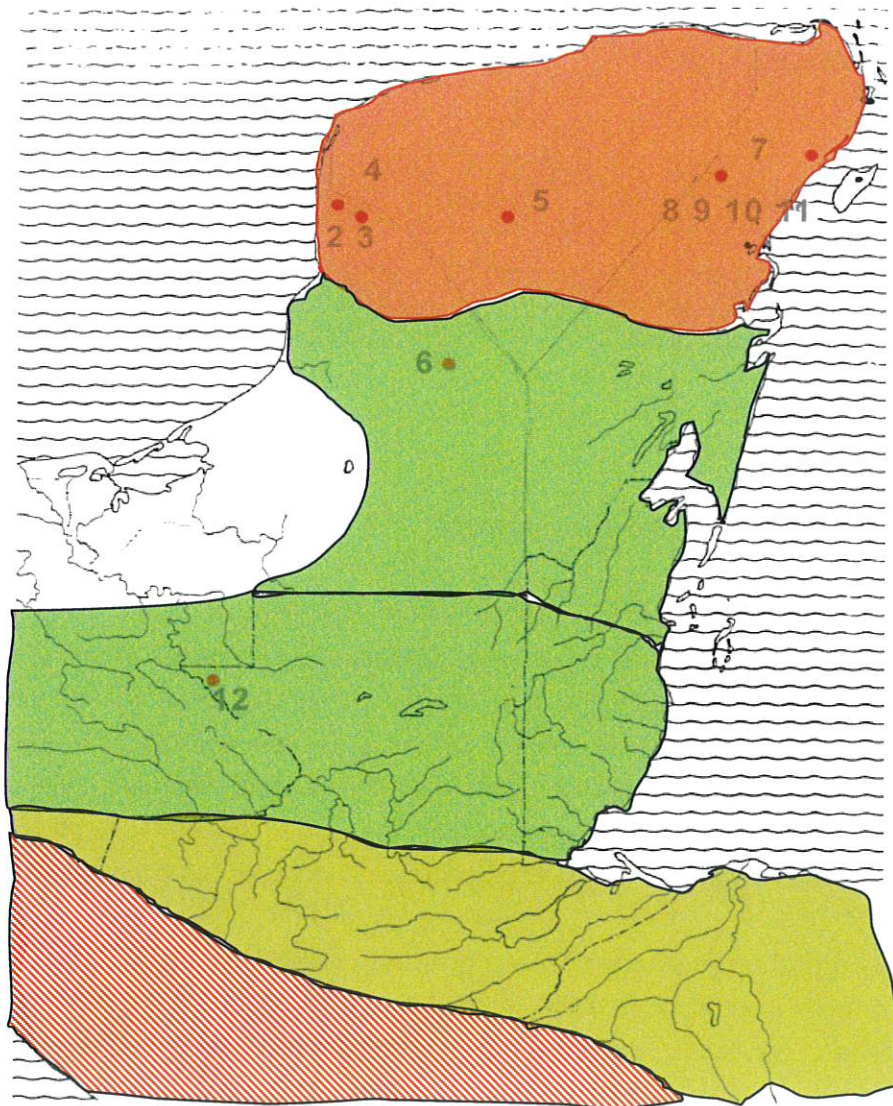


Fig. 54 : Carte de répartition des sols calcaires et argileux

De la comparaison de la composition en pourcentage atomique des enduits du groupe 1, il est possible de faire deux sous groupes : ceux qui contiennent une argile pour l'enduit de finition (échantillons 1 et 4) et ceux qui n'en contiennent pas (échantillons 3 et 6).

Support	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1	33	50,3	0,5	0,5	8,8	6,7	-
4	34,7	49,4	0,3	0,14	7,0	8,3	-
3	50,9	37,4	0,3	0,5	2,3	8,4	0,1
6	52,0	37,2	0,3	1,6	2,6	5,8	0,3
12	27,8	56,7	8	0,1	0,2	17,4	-

Soit, en rapports atomiques :

	O/C	Ca + Mg / C
1	1,5	0,22
4	1,4	0,20
3	0,7	0,17
6	0,7	0,11
12	2	0,55

### La fabrication des enduits chez les mayas

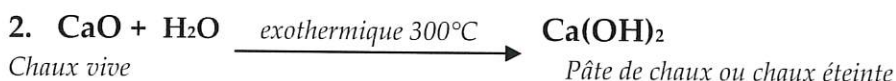
En accord avec les informations ethno-historiques et les analyses physico-chimiques des échantillons de peintures murales, la technique maya de fabrication des enduits est différente de celle que nous aurions pu imaginer en référence aux techniques occidentales. En observant les images du microscope électronique à balayage, des questions se posent : comment les mayas réussirent-ils à intégrer si parfaitement les différentes phases de sascab et de chaux ? pourquoi les mayas travaillaient-ils la chaux avec un liant organique ?, de quel liant s'agit-il ?

Nous croyons que l'addition de gommes végétales au mélange de chaux est une solution technique apportée par les mayas pour résoudre les problèmes imposés par un milieu ambiant extrême, particulièrement le problème des hautes températures.

La chaux, comme tout composé minéral est formée de petits cristaux. Elle est issue de la calcination de roches calcaires et forme la « chaux vive » qui est ensuite hydratée par addition d'eau pour donner la chaux éteinte. Cette dernière étape aboutit à la formation de lamelles qui donne à la pâte de chaux sa plasticité et son

adhésivité. En séchant cette pâte se transforme en carbonate de calcium résistant, par réaction avec le dioxyde de carbone de l'air. Pour obtenir les propriétés plastiques, adhésives et de résistance de la pâte de chaux, il faut une hydratation complète des oxydes de calcium et une prise (ou un séchage) lente pour que la formation des cristaux se fasse dans les meilleures conditions.

La réaction chimique se fait en trois étapes :



Nous avons connaissance des effets négatifs des hautes températures sur les étapes de fabrication d'un enduit de chaux : l'augmentation de température diminue la solubilité des oxydes de calcium. La solubilité d'une solution d'hydroxyde de calcium à 0°C est de 0,185 g / 100 g de solution saturée (pH = 13) ; à 40°C, les oxydes de calcium précipitent et la solubilité et le pH diminuent : 0,140 g / 100 g de solution saturée, pH = 11.

Des expériences réalisées des chimistes de l'industrie moderne de la chaux signalent que les monosaccharides dissous dans l'eau servant à éteindre la chaux, augmentent la solubilité des oxydes de calcium<sup>5</sup>. Les mayas aboutirent peut-être exactement à la même conclusion. De cette manière, les artistes mayas résolurent le problème des hautes températures du milieu ambiant.

### L'ajout de gomme végétale

D'autre part, l'addition de gommes végétales à la pâte de chaux améliore ses propriétés de prise à l'air. Les gommes sont des matériaux hygroscopiques qui forment des solutions colloïdales et qui aident à retenir l'humidité à l'intérieur de l'enduit permettant au séchage de s'effectuer lentement et de manière homogène.

<sup>5</sup> BOYTON, R. . *Chemistry and technology of lime and limestone*. éd. New York : Interscience Publishers, John Wiley and sons, 1966, p. 176-177.

Ces propriétés des solutions colloïdales sont d'ailleurs utilisées en conservation - restauration d'enduits de chaux<sup>6</sup>.

Les références citées par Diego de Landa<sup>7</sup> dans sa *Relacion de las cosas de Yucatán* [1581], sont très importantes pour le déchiffrement des techniques de fabrication des enduits à l'époque préhispanique. Il mentionne que « la force des enduits est due à une certaine eau où auraient macéré des gommés issues d'un arbre ». Il précise que cette eau sert également à « brunir ou polir les enduits ». Littmann<sup>8</sup> rapporte que cette même pratique perdurait encore dans les années soixante au Yucatán. Le dictionnaire *Cordemex* désigne *Holol* comme étant un arbre à l'exsudat collant (*Belotia* spp). *Hol'ol* signifie également une solution alcaline et *holola*, le caractère collant, onctueux et lubrifiant. Il y a de nombreuses autres sources de gommés végétales référencées dans la littérature : chucum (*Pithecolobium albicans*), chacté (*Caesalpinia platylba*), chacah (*Bursera simaruba*), Jabin (*Pescidia communis*).

Les artistes mayas préparaient probablement le mélange de chaux vive et de sables calcitiques à sec pour permettre une meilleure distribution des solides. Puis ce mélange était recouvert d'eau « gommeuse » de *holol*. La réaction exothermique de la chaux vive et l'alcalinité de la solution contribuaient à l'hydrolyse des polysaccharides en monosaccharides, augmentant ainsi la solubilité de la chaux vive.

La restauratrice Frida Mateos observa lors d'un séjour au Yucatán que cette réaction avait lieu dans une sorte de monticule de chaux « *caleras* » préparé à cet effet dont plusieurs vestiges ont été retrouvés lors des fouilles à Chichen Itza. Ces dômes étaient fermés et soigneusement lutés afin d'éviter tout contact entre l'air et le mélange de chaux vive et d'eau gommée qui se trouvaient à l'intérieur. Au bout de deux semaines une ouverture amovible était réalisée dans le dôme afin de prélever de la chaux tout en gardant une certaine humidité pour la pâte de chaux qui n'était pas utilisée.

Le mélange pâte de chaux, sascab et gommés végétales est le reflet d'une grande avancée technologique qui a permis aux mayas de développer leur art dans des conditions environnementales bien particulières de chaleur et d'humidité. Nous savons que cette méthode de préparation des enduits est constante du classique au postclassique. Les évolutions concernent plutôt l'histoire minérale des régions et son influence sur les techniques locales comme nous avons pu le voir avec nos analyses.

---

<sup>6</sup> FERRAGANI, FORTI, MALLIET et TORRACA. *Techniche di conservazione degli intonaci : L'intonaco, Storia, Cultura e Tecnologia*. Atti del Congresso di studi, Rome, 1985, p. 328-333.

<sup>7</sup> *Op. cit*

<sup>8</sup> LITTMANN, E.R. Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters and Stuccos : the Use of Barks Extracts in Lime Plasters. *American Antiquity*, 1960, vol 25, n°4, p. 593-596.

## Type de chaux utilisée selon les régions

La densité, la résistance mécanique à l'humidité, l'état de conservation des enduits dépend du type de roches calcaires utilisées pour fabriquer la chaux.

Les régions du nord de la péninsule du Yucatán, sont riches en calcite et aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ). Ces minéraux sont susceptibles d'être dissous par l'eau, c'est pourquoi est associé à ce type de sol un relief karstique, dont les cavités abritent souvent des rivières souterraines que l'on appelle « cenotes ». C'est là que l'on trouve des formations géologiques de type argiles « sak lu'um » (palygorskites) et des sables silico-calcaires « sascab ».

Dans les régions du sud, Usumacinta et Chiapas, les sols sont riches en calcaires dolomitiques et magnésites (forte proportion en magnésium). Les calcaires dolomitiques contiennent au minimum 20% de carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$ . A 50%, on a de la *dolomite* ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ). Les roches calcaires dolomitiques sont moins solubles dans l'eau que les calcites et le pH de la solution est plus faible : 10,5. En conséquence elles forment des croûtes moins poreuses qui permettent l'accumulation de terre en superficie. La dolomite est associée à des argiles comme la montmorillonite et la muscovite. La chaux dolomitique est peu soluble dans l'eau (100 fois moins que la chaux calcitique) car au moins 20 % de celle-ci est inerte : en effet MgO formé par calcination ne réagit pas avec l'eau. En conséquence l'ajout de gommes végétales dans ce cas, améliore les propriétés de la chaux et rendent l'enduit plus homogène. Nous comprenons bien ici le double intérêt de l'utilisation de liants pour la fabrication d'enduits à base de chaux dolomitique. Comme nous avons pu le voir sur les photos MEB, les enduits calcitiques sont moins compacts que l'enduit dolomitique.

Pour la région de la côte orientale, la chaux provenait à la fois de la calcination de coquilles d'organismes marins et de l'intérieur des terres (calcite, aragonite).

Les études de Magaloni sur une vingtaines d'échantillons, montrent qu'il existe dans l'aire maya quatre groupes techniques :

Groupe	type de chaux	charges	liant	polissage	résistance	localisation
1	Dolomite Calcite/dolomite	Chaux éteinte Sascab + chaux éteinte	Oui Oui	Pas toujours	résistants	Chiapas Campêche
2	Calcite pure	Pas sascab	Peu liant	Oui	résistant	Yucatán
3	Calcite/plâtre	Sascab	Oui	Oui	résistant	Yucatán et Quintana Roo
4	Aragonite	Pas sascab Calcites clastiques	Oui	Pas toujours	fragile	Quintana Roo



Notons que le polissage des enduits de chaux à base de calcite pure permet d'augmenter la résistance de ceux-ci.

Il n'est pas possible de savoir si le mélange chaux / plâtre du groupe 3 est volontaire, ou s'il résulte d'une dégradation du carbonate en présence de soufre.

Le groupe 4 appartient exclusivement à la période Postclassique, alors que les autres groupes appartiennent plutôt à la période Classique.

Nos résultats se calquent sur ceux de Magaloni : les échantillons analysés correspondraient plutôt au seul groupe 1.

### 3) Couche picturale et techniques

Grâce à la microanalyse EDX, il est possible de définir deux groupes d'échantillons dont la composition de la couche picturale diffère. Tous possèdent une argile mais n'est pas de même nature, ce n'est pas toujours une palygorskite.

Le premier groupe, avec une palygorskite, est constitué des échantillons 1 et 4 : ICHMAC et CHELEMI ; le second, sans, est formé par les échantillons 3, 6 et 12 : ICHMAC, DZIBILNOCAC et LA PASADITA.

On remarque que ce regroupement rejoint celui établi pour le support.

<i>Couche picturale</i>	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	P
<b>1</b>	34,2	39,5	3	0,9	10,7	9,2		1,2
<b>4 bleu 1</b>	35,23	49,55	0,36	0,22	6,66	7,85		
<b>4 bleu 2</b>	42,82	42,41	1,25	0,46	11,66	1,18	0,3	
<b>3</b>	57	31,3	0,4	0,3	0,7	7,2	0,1	2,8
<b>6</b>	59,0	31,2	1,4	1,3	5,8	0,9	0,2	
<b>12</b>	24,0	60,7	9,6	0,1	0,7	4,8	0,1	

#### **Techniques d'application de la couleur**

En nous fondant sur l'observation de nos échantillons et sur les travaux de Magaloni et Falcon, nous voyons se dessiner différentes traditions coloristiques.. Des sites de l'époque classique de régions différentes partageaient la même technique de fabrication de la couleur, la même large gamme de tons. Les évolutions sont plutôt d'ordre temporelle, les sites du postclassique montrent une utilisation homogène de la couleur réduite à deux ou trois tonalités. Notons également qu'à cette période le vert disparaît de la palette du peintre. L'aire maya est divisée selon quatre traditions coloristiques. Nos échantillons 1, 2, 3, 4, 6 appartiennent à la première tradition alors que les échantillons 7, 8, 9, 10, 11 font partie de la quatrième tradition (cf. tableau ci contre).

Traditions	Caractéristiques	Régions	Sites	Epoques
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Bleu et vert maya fabriqués à partir d'argile, d'indigo et du mélange avec un autre colorant jaune pour le vert</li> <li>➤ Mélange des bleus et vert mayas avec azurite, malachite, hématite</li> <li>➤ Superposition de couches rouge, jaune, bleu foncé ou noir pour donner des variations de tonalités des bleus et verts mayas</li> <li>➤ L'argile est presque toujours une palygorskite</li> </ul>	Campêche  Chiapas  Yucatán  Quintana Roo	Xuelen, Ichmac, Chelemi  Bonampak, Palenque, La pasadita  Chacmultun , Chichen Itza (las monjas)  Coba (el cuartel)	Classique
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ L'argile est une kaolinite</li> </ul>	Yucatán	Chichen Itza (jaguaires superior)	
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pas de mélanges avec d'autre pigments minéraux</li> <li>➤ Pas de superposition de couches</li> <li>➤ Palette moins riche</li> </ul>	Yucatán  Campêche	Dzula, Sodzil, Kabah, Uxmal,  Chicanna	
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pas de vert maya</li> <li>➤ Une seule couleur bleue « mer des caraïbes »</li> <li>➤ Présence d'une argile pas toujours vérifiée</li> <li>➤ Superposition de cette couleur pour donner un ton moyen</li> <li>➤ Mélange de cette couleur avec de la chaux pour donner un ton clair</li> </ul>	Quintana Roo	Coba, Xelha, Rancho Ina, Tulum, ...	Postclassique

Tableau XVIII : traditions coloristiques dans l'aire maya

### Comment peignaient les mayas ?

La pratique encore vivante au Yucatán dans les années 1960, ainsi que les reconstitutions ont montré que les enduits fait de chaux, sascab, et gommés végétales possédait un temps de séchage plus long qu'un enduit de chaux classique. Cette caractéristique permettait aux peintres d'exécuter certaines parties de la composition sur un enduits frais procurant alors aux couches picturales un certaine résistance. Ce n'est pourtant pas une technique *a fresco*, les pigments étaient mis en suspension dans un liant similaire à celui de l'enduit : un mélange d'eau de chaux et de gommés végétales. La viscosité pouvait être modulée permettant ainsi d'obtenir les textures et les transparences voulues. Les détails comme les plumes de quetzal, les collier de jade ou de turquoise, étaient exécutés *a secco*. Ici encore, l'association minéral-végétal, inorganique-organique est à la base de la pratique picturale maya.

Codex Azoyu I, Bibliothèque National d'Anthropologie et d'Histoire, Mexique  
Epoque coloniale,  
© photo Tatiana Falcon Alvarez, Instituto de Investigaciones Esteticas  
Atlas Munsell et colorimètre  
© photo Sonia Ovarlez

---

# Etude colorimétrique

## Troisième partie



Calakmul, Campêche, Mexique  
Peinture murale d'une banquette. Structure A .  
Préclassique terminal,  
© photo Sonia Ovarlez

## Chapitre 5

---

Les bleu-vert des peintures murales de l'aire maya sous « l'œil » du colorimètre





Quel observateur attentif d'une peinture murale ancienne n'a pas rêvé de pouvoir évaluer objectivement la richesse de la palette chromatique utilisée par l'artiste, et de comparer de ce point de vue divers décors répartis dans l'espace et le temps ? Tel est le thème que nous aborderons ici à propos des peintures murales mayas des époques classique et postclassique.

Que pouvons nous attendre de la colorimétrie ? Elle permet tout d'abord de passer du subjectif à l'objectif pour juger les couleurs employées dans un décor ; elle rend possible les comparaisons de couleurs entre décors différents, où qu'ils se trouvent et quelle que soit la nature de la lumière qui les éclaire. Elle permet également de préciser certaines particularités des techniques picturales, comme le nombre de couleurs de base utilisées, la richesse de la palette chromatique employée et le type de mélanges effectués.

Nous allons donc définir dans ce chapitre l'étendue de la palette du peintre ainsi que les codes de couleurs utilisés dans l'iconographie maya. Puis nous comparerons les couleurs utilisées par les mayas avec celles du nuancier.



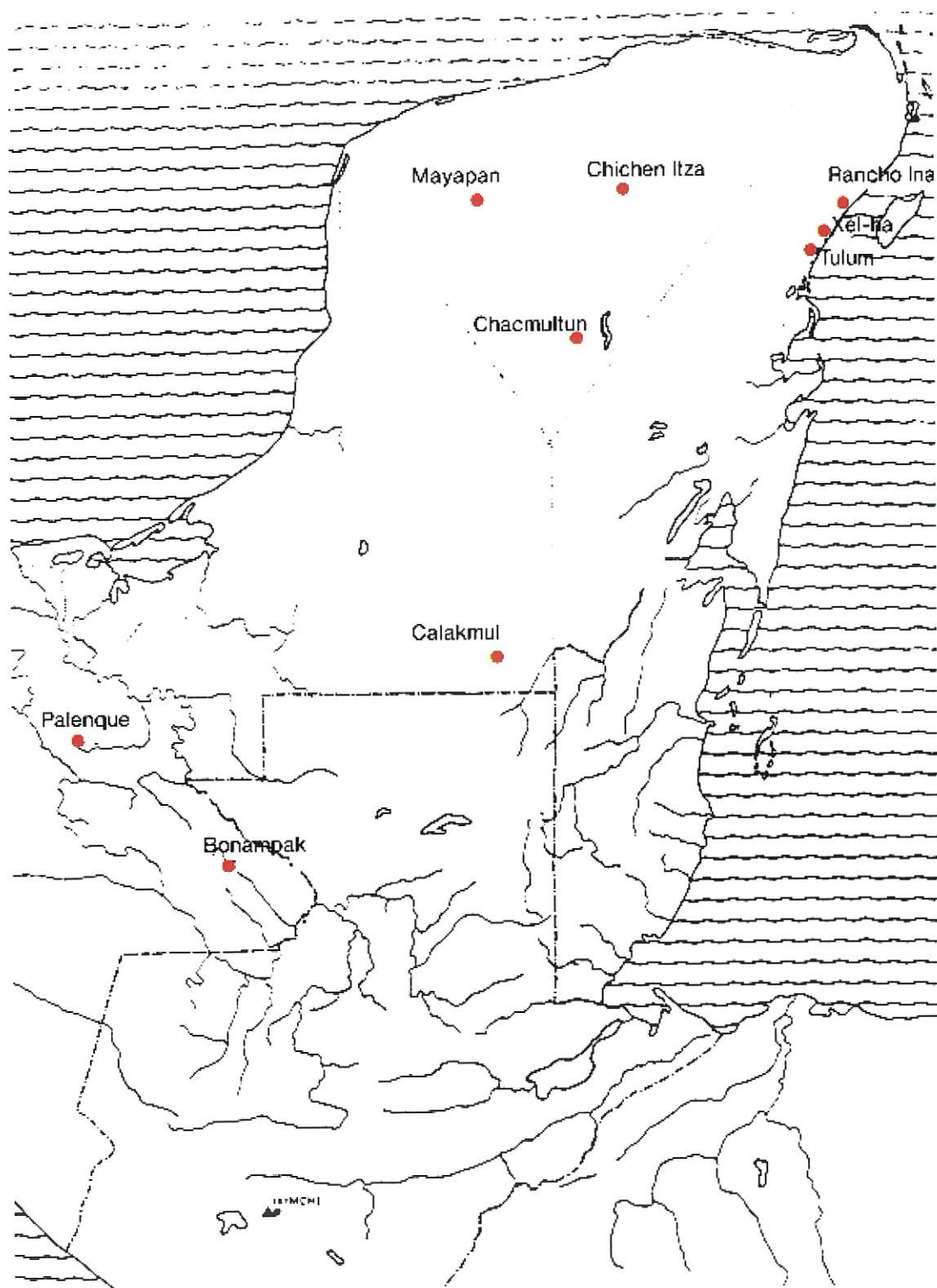


Fig. 55 : Localisation des sites archéologiques choisis pour l'étude colorimétrique

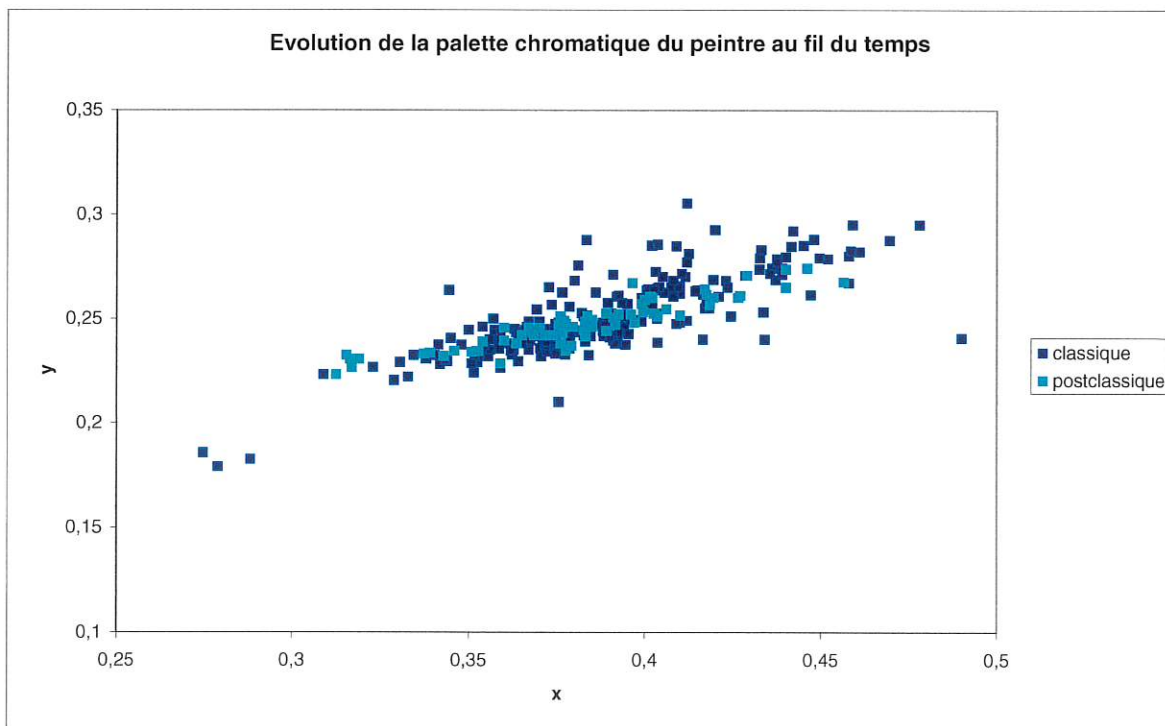
# 1

## Etendue de la palette du peintre maya

C'est lors d'un voyage effectué en mars 2003 dans l'aire maya, dans les états actuels du Campêche, Chiapas, Yucatán et Quintana Roo, que nous avons réalisé avec Sandra Zetina<sup>1</sup> cette étude colorimétrique *in situ* de vingt deux peintures murales appartenants à des sites d'époques différentes.

Chaque mesure colorimétrique a été effectuée deux fois. Par moi même au colorimètre Minolta et par Sandra Zetina à l'aide d'un code Munsell. Bien nous à pris de doubler ces mesures car nous nous sommes aperçu après que les mesures du colorimètre étaient entachées d'une erreur systématique. Un des filtres a probablement été endommagé Les valeurs relatives sont toutefois correctes et l'interprétation des résultats reste possible. Faute de temps pour corriger nos 1500 mesures grâce aux données Munsell nous présentions ici les données mesurées sous le nom de données non corrigées. En revanche pour le chapitre 2, les mesures effectuées sur le nuancier l'ont été avec un autre colorimètre et sont exactes. Chaque point représente la moyenne des deux valeurs numériques données par le colorimètre.

### 1) Comparaisons des palettes chromatiques classique et postclassique



<sup>1</sup> Restauratrice travaillant au *Laboratorio de Diagnostico de Obras de Arte* de l'Institut de Investigaciones Esteticas de l'Université Nationale Autonome de Mexico qui m'a accueilli pour un stage de quatre mois.

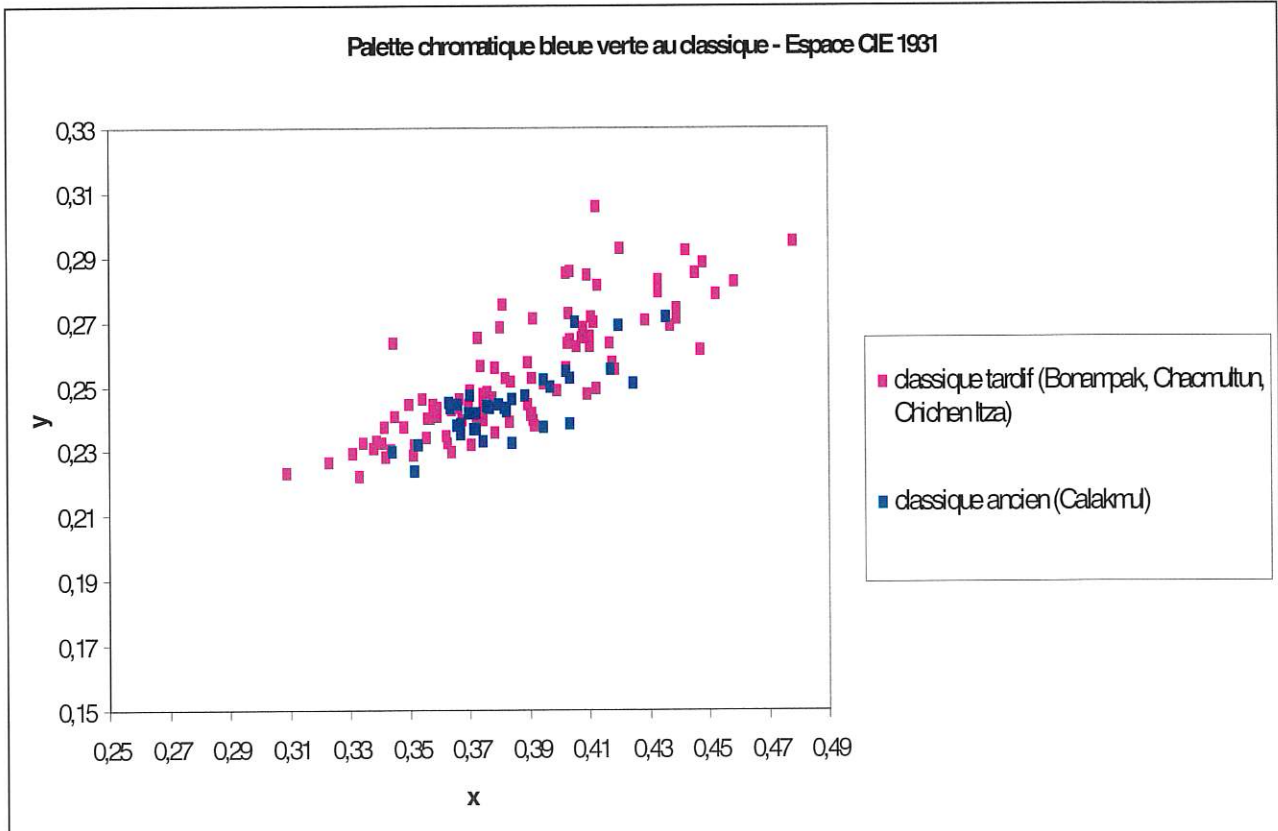
L'observation de ce diagramme permet de mettre en évidence deux points :

- La palette bleu-vert est étendue en saturation.
- La palette du classique est étendue en longueur d'onde, c'est-à-dire en dispersion de la géodésique, alors que la palette du postclassique est restreinte et se cantonne strictement à la géodésique.

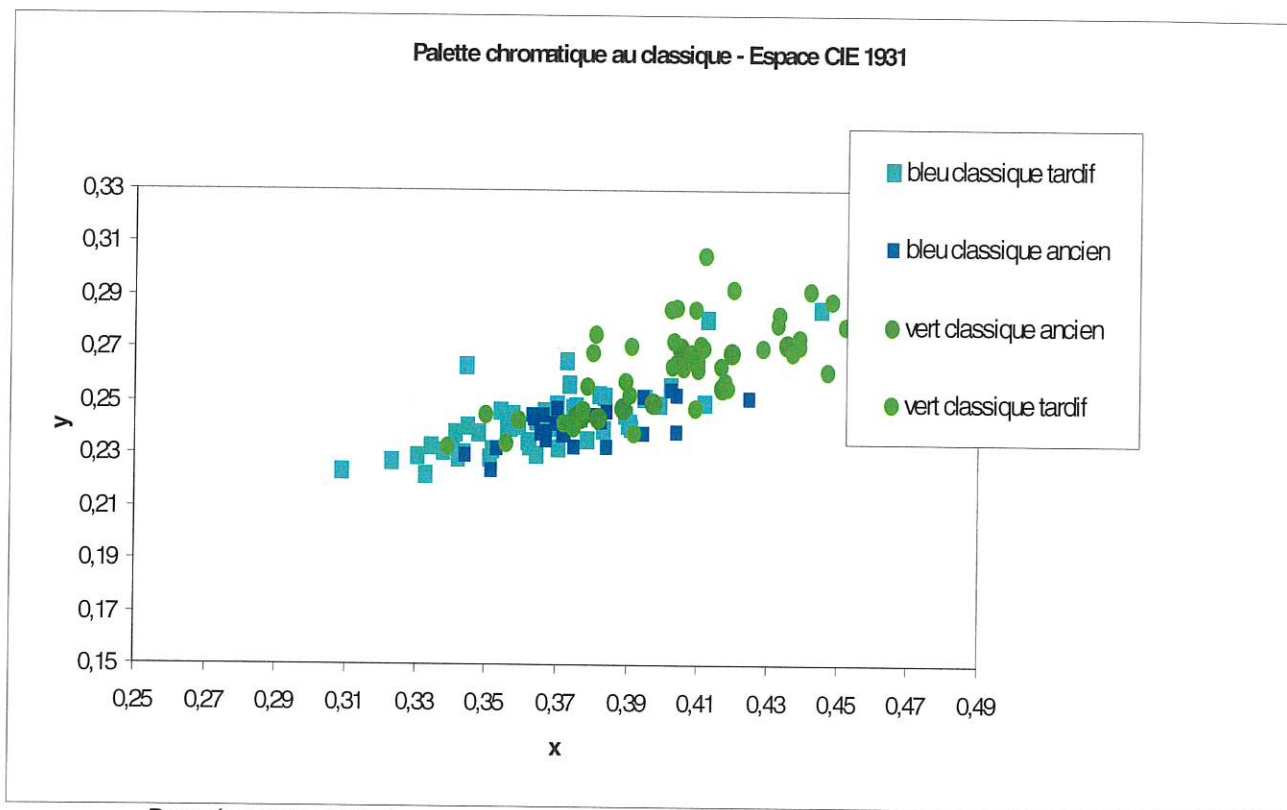
Le passage à l'ère du postclassique s'accompagne donc d'une diminution du nombre de couleurs bleues et vertes utilisées par les peintres. Ces résultats confirment les remarques faites lors de l'étude des coupes transversales des échantillons archéologiques .

Nous pouvons voir les prémices de cette réduction de la palette chromatique en regardant l'évolution des palettes au sein de chaque époque.

## 2) Comparaison des palettes chromatiques au classique



Données non corrigées



A l'époque classique la palette s'enrichit : la gamme de bleus augmente, mais l'augmentation la plus significative est celle de la gamme de verts.

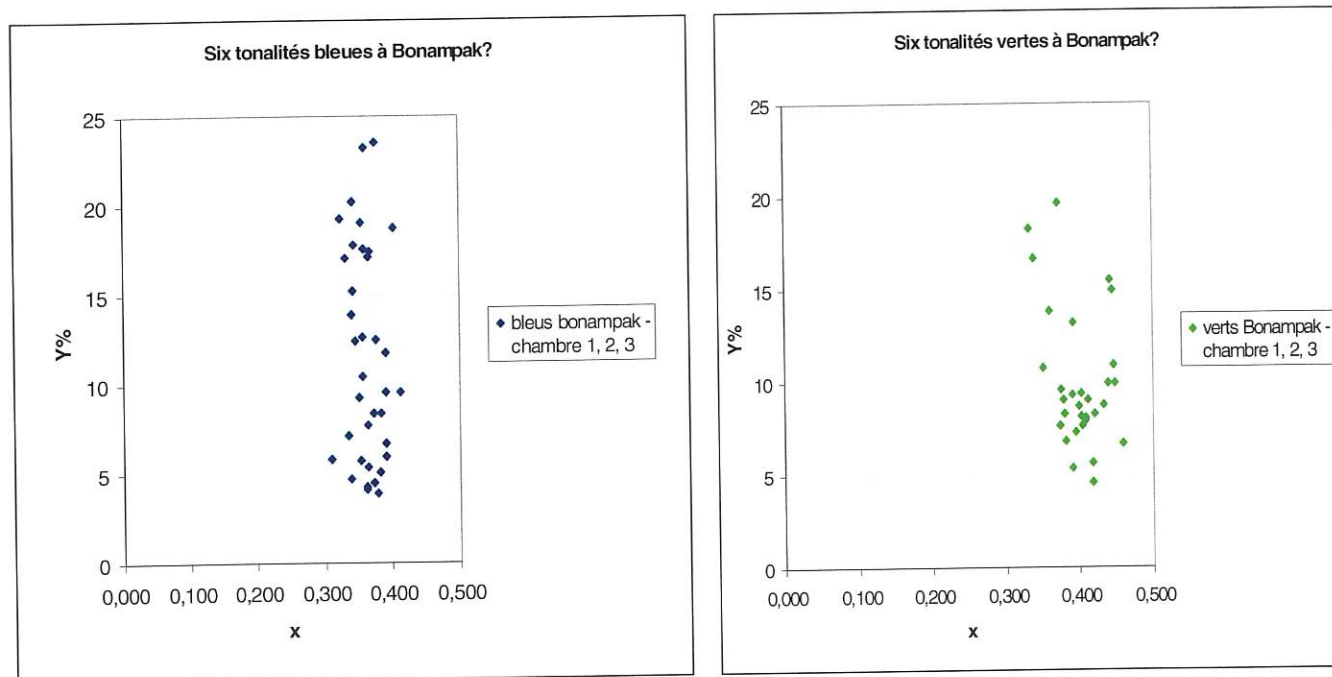
Sur le graphique, on voit pour le classique ancien, beaucoup moins de nuances de couleur cependant on ne peut pas vraiment connaître le nombre de ces nuances. Il n'est pas possible d'affirmer l'hypothèse émise au cours de notre voyage sur le fait que l'on pouvait compter trois tonalités bleues et trois verts.

C'est probablement à cette époque, début de l'apogée de la civilisation maya, que les bleus et verts mayas sont découverts. C'est pourquoi au classique tardif, on assiste à une explosion de l'utilisation de couleurs, avec comme exemple le plus probant : le site de Bonampak. Les auteurs précédents lors de leurs observations y comptaient six tonalités bleues et six vertes<sup>2</sup>. Or ici, les 60 mesures effectuées avec le colorimètre, ne nous permettent pas de distinguer le nombre réel de tonalités. Nous avons de nombreuses nuances.

En ce qui concerne les tonalités bleues, outre le fait que la dispersion des points puisse résulter de différentes techniques de superpositions colorées, il est possible que celles-ci puissent provenir de l'utilisation d'argile de nature différente. La couleur du pigment étant en relation avec les liaisons chimiques établies entre l'argile et l'indigo, celle-ci est donc forcément différente avec d'autres argiles que les palygorskites (cf. chapitre 2).

<sup>2</sup> Ces couleurs sont issues de différentes techniques de superpositions de couches colorées.

On peut donc émettre l'hypothèse qu'au classique plusieurs argiles étaient utilisées pour la fabrication des bleus mayas en fonction de la nuance désirée.



Données non corrigées

Pour les verts, les groupes de points sont plus distincts et l'on peut peut-être en dénombrer cinq dont l'un serait formé de plusieurs nuances.

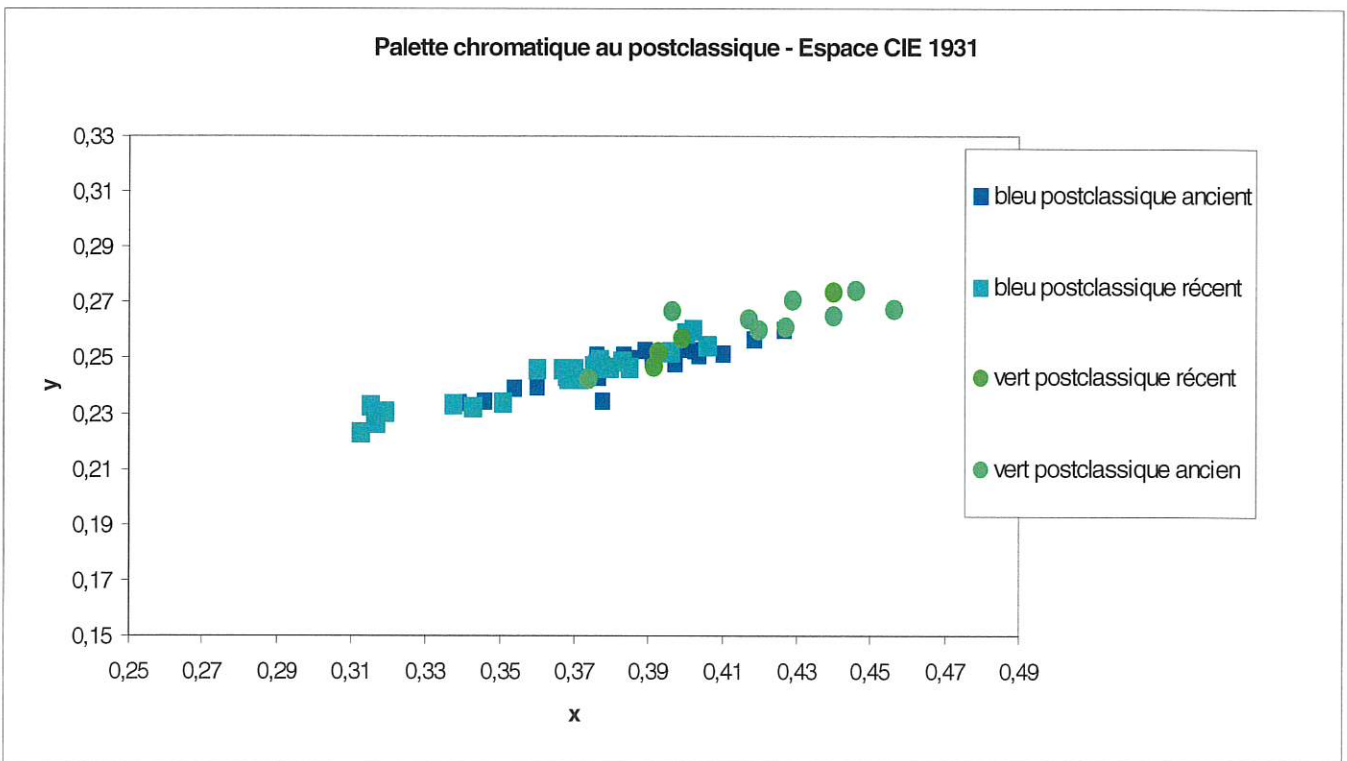
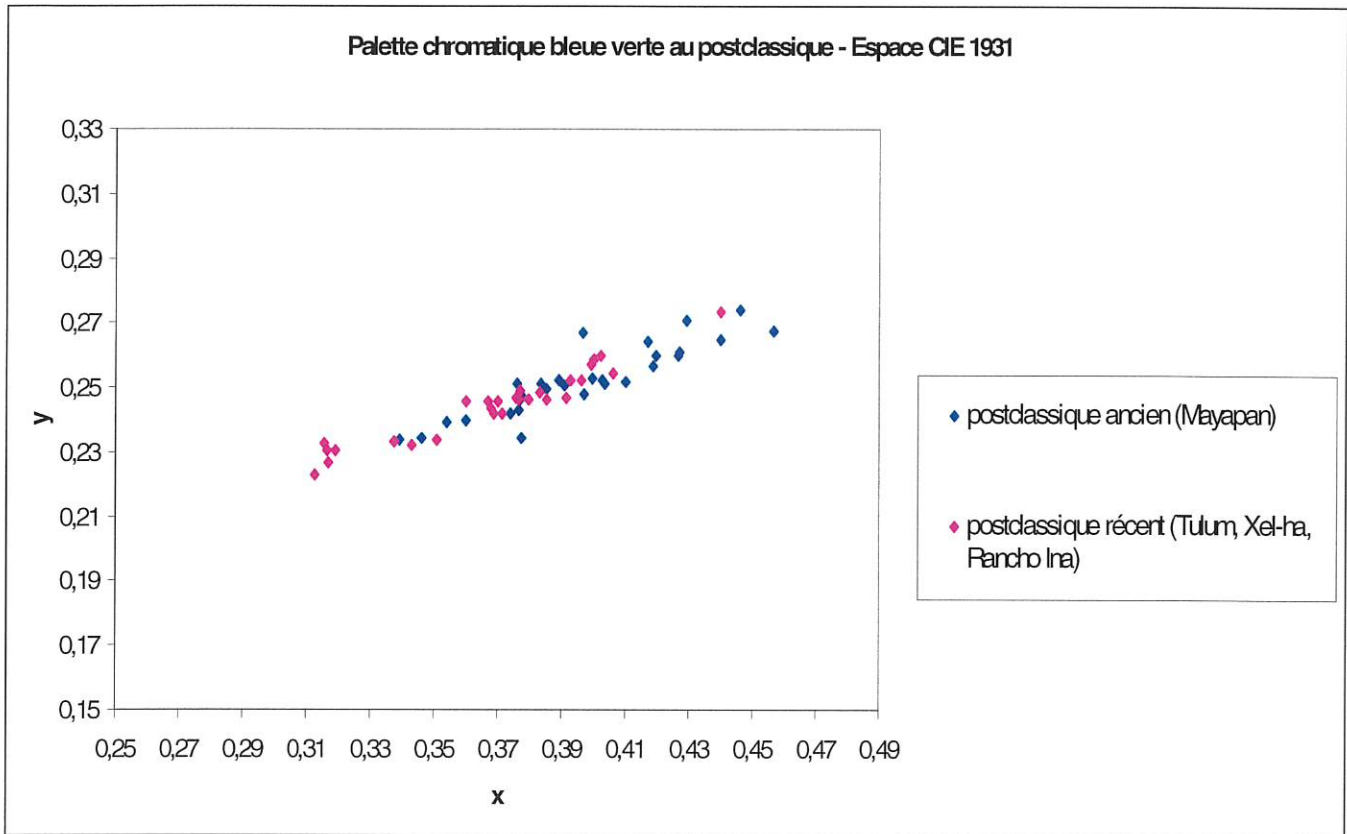
Pour les bleus, cette distinction est beaucoup moins évidente. Chaque tonalité possède de nombreuses nuances ce qui donne au niveau du graphique un étalement presque continu des points.

### 3) Comparaison des palettes chromatiques au postclassique

Entre le classique tardif et le postclassique ancien la palette se réduit, mais les verts sont toujours présents (cf. graphique ci-contre).

Au postclassique récent, les verts disparaissent quasiment de la palette du peintre. Ces verts, sont en fait, très bleu. Il n'y a pas de vrais verts (points beaucoup plus décalés vers le haut) comme c'était le cas au classique.

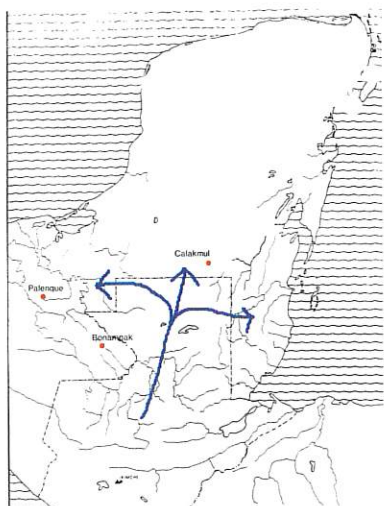
La palette du postclassique tardif se cantonne à la géodésique et d'après l'hypothèse déjà émise, on peut penser qu'ici il n'y a pas qu'une argile qui est utilisée.



Regardons plus en détail l'évolution de la palette, en nous intéressant aux spécificités régionales .

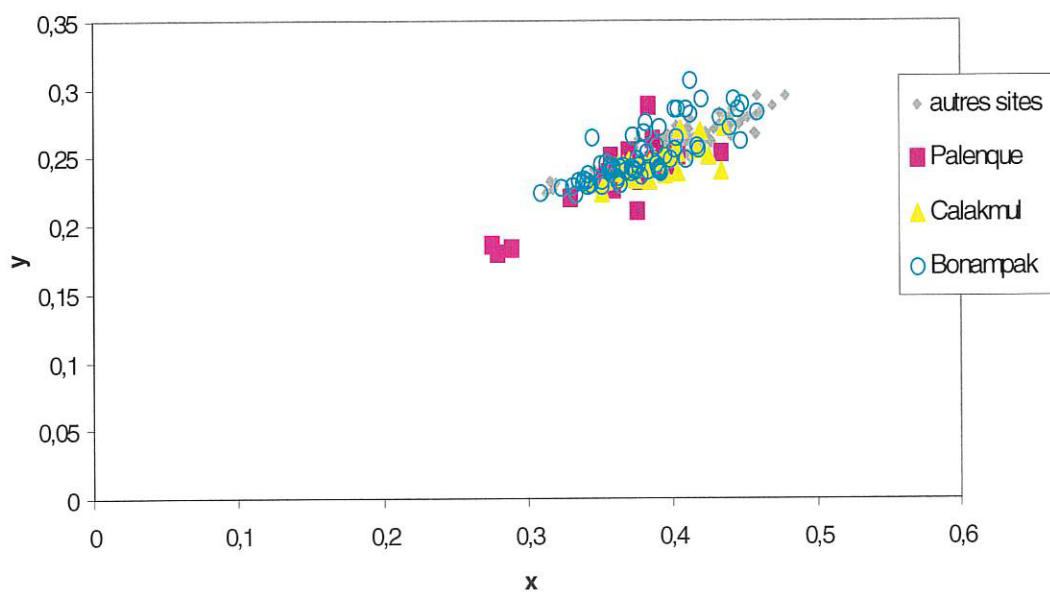
## 4) Evolution de la palette maya en fonction des régions

### a) Des hautes terres du Guatemala aux basses terres méridionales mexicaines



L'occupation des basses terres méridionales correspond à l'époque classique (ancien et tardif). Les civilisations des hautes terres du Guatemala migrent vers la région du Péten (Calakmul, classique ancien) puis prolifèrent d'est en ouest dans les basses terres centrales (Palenque, Bonampak, classique tardif).

Palette chromatique des basses terres méridionales (Chiapas, Campeche) au classique



Données non corrigées

C'est à Bonampak que l'on trouve la gamme de couleurs la plus riche. D'ailleurs cet ensemble de peintures est considéré comme le summum de l'art pictural maya tant par les couleurs utilisées que la maîtrise et le style des artistes. Ces peintures murales sont très bien conservées contrairement à celles de Palenque. Aussi il n'est pas réellement possible de se rendre compte de la gamme colorée de Palenque puisque le nombre de mesures effectuées est beaucoup moins important. Pour Palenque, on voit trois points isolés au bas de la géodésique : ils correspondent aux couleurs utilisés pour décorer les stèles. La gamme de couleurs des peintures murales est différente de celles des autres artefacts mayas comme les céramiques (encensoirs), les codex et les stèles. Pour ceux-ci, la palette est beaucoup plus restreinte et contient rarement des verts.



Fig. 56 : Détail de la banquette peinte de Calakmul, pyramide A6, classique ancien.

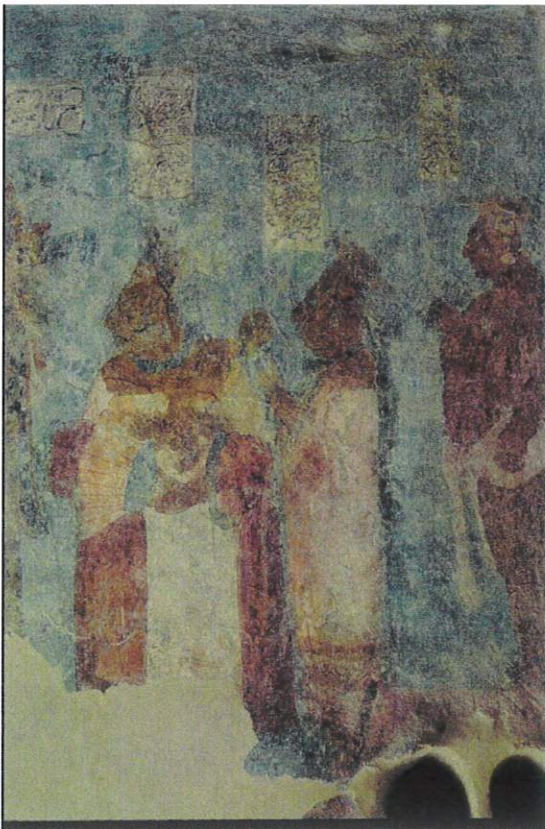
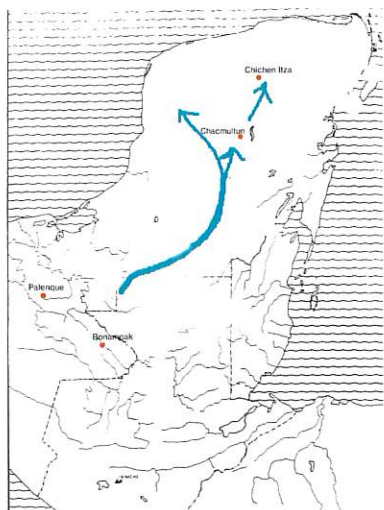


Fig. 57 : Détail de la chambre 2 du temple des peintures de Bonampak, mur nord, registre 2, classique tardif.



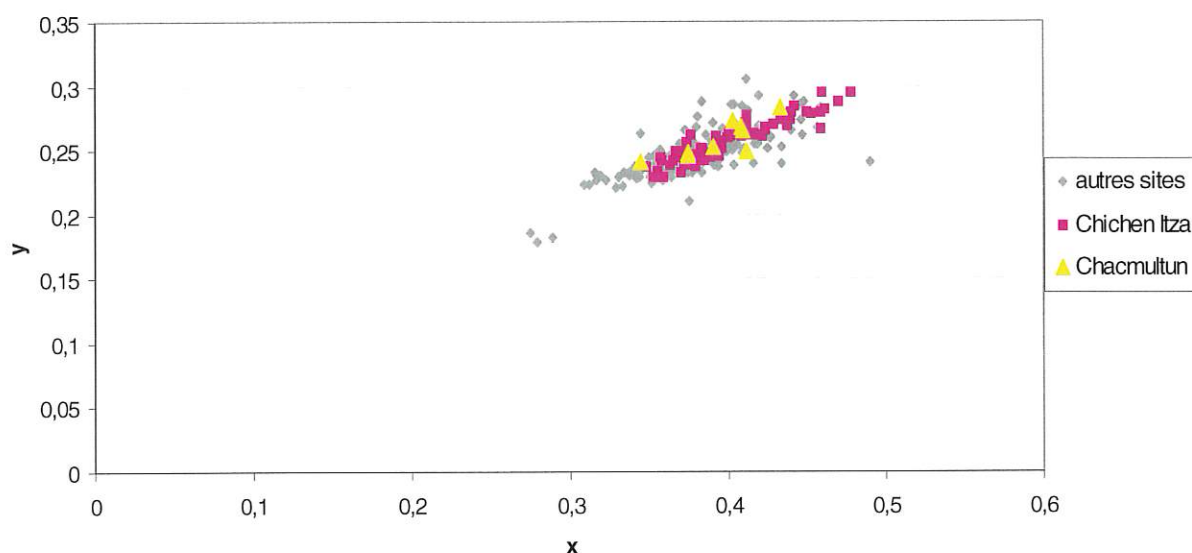
## b) Les basses terres du nord



A nouveau , le pôle culturel se déplace à la fin de classique tardif, cette fois vers les basses terres du nord. C'est la fin d'une époque, la chute de la civilisation maya dans sa forme classique.

La gamme de couleurs est semble moins importante. On ne remarque pas de dispersion des points comme pour les Basses Terres méridionales et centrales, les points suivent la géodésique.

Palette chromatique des basses terres septentrionales (Yucatan) au classique



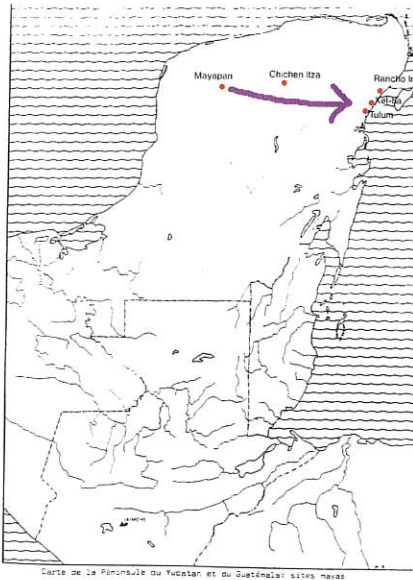
Données non corrigées

Peut-être pouvons nous voir là la conséquence de l'exploitation de l'utilisation de matériaux issus d'une région beaucoup plus pauvre en ressources minérales et végétales.

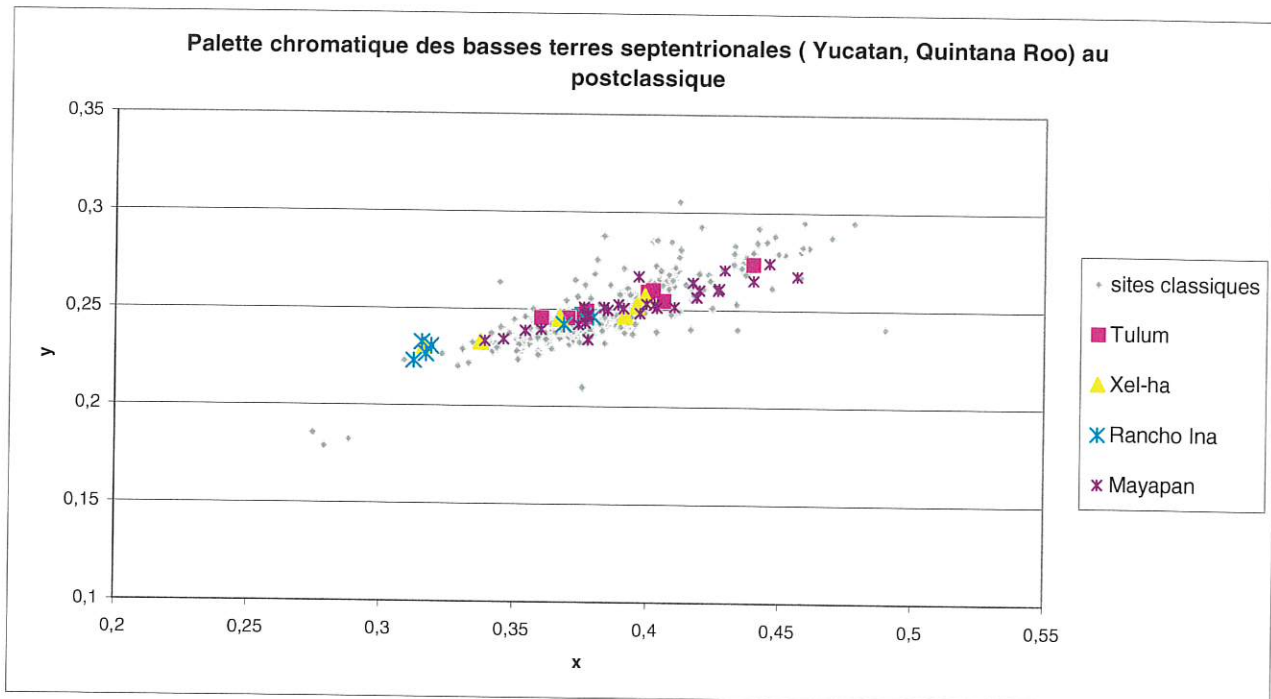


Fig. 58 : Détail de la chambre 22 de la pyramide « Monjas », Chichen Itza, classique tardif.

c) Des basses terres du nord vers la côte orientale



Le postclassique est dominé pour un temps par la ville de Mayapan qui devient la capitale du Yucatán. Puis à nouveau le pôle culturel se déplace au postclassique tardif vers la côte orientale du Quintana Roo.



Données non corrigées

Pour l'époque postclassique, le site de Mayapan est celui qui possède la gamme de couleur la plus étendue. Par rapport au classique, le langage artistique se modifie, marqué par une influence des populations tolèques du Mexique central, mais il n'en conserve pas moins des traits dérivés de la culture des terres méridionales. Par contre la palette chromatique change radicalement au postclassique tardif comme nous l'avons vu sur les premiers graphiques. On ne dénombre au maximum que deux ou trois bleu-vert comme pour Tulum, dont on nomme le style : « Tulum monochrome ». Pour Xel-ha et Rancho Ina, la réduction de

la palette s'accroît encore. Cette modification dans l'utilisation des couleurs s'accompagne d'une évolution des techniques, comme nous l'avons vu dans le chapitre 4 pour les sites du Quintana Roo, mais aussi d'une évolution de style : compositions de plus grande complexité, traits fins sans pleins ni déliés et d'une largeur constante, division de la paroi en de nombreux registres, motifs de petite taille et multiplication des détails.

A partir de cette époque il y a eut une sorte d'uniformisation, à la fois chromatique et stylistique, dans la manière de peindre les murs. Les artistes avaient alors atteint une telle maîtrise de l'écriture picturale qu'ils pouvaient se passer de la couleur et exprimer des concepts de plus en plus complexes sur des surfaces plus réduites. Mais probablement un autre phénomène pourrait être à l'origine de la réduction de la palette chromatique : la commercialisation de pigments, peut-être sous forme de pains comme le mentionnent les sources du XVI<sup>e</sup> siècle, détenue par quelques fabricants qui n'utiliseraient qu'une seule argile. La fabrication du bleu maya ne serait elle plus réservée au corps sacerdotal et au peintre ?



Fig. 59 : Détail de la peinture murale dite du « pêcheur », Structure Q95, Mayapan, postclassique ancien.



Fig. 60 : Détail de la banquette de la structure Q161, Mayapan, postclassique ancien.



Fig. 61 : Façade extérieure de la « casa azul », Rancho Ina, post classique récent.



Fig. 62 : Détail du sanctuaire intérieur de la « casa azul », Xel-ha, post classique récent.

En résumé, l'évolution de la palette maya est surtout liée à la chronologie. Les changements les plus importants interviennent lors de la découverte du bleu et des autres pigments de même nature et lors du passage à l'ère postclassique. Cette évolution chronologique est intimement combinée aux migrations des mayas et donc à un facteur régional.

Lors de notre voyage dans l'aire maya, nous avons remarqué dans des sites de régions différentes mais de même époque, une constance des couleurs utilisées. Cela est d'autant plus significatif que l'utilisation de certaines tonalités spécifiques est toujours associée au même objet ou à une même représentation. C'est ce que nous allons étudier maintenant.



Fig. 63 : Représentation des bijoux et coiffes d'apparat dans différents sites du classique

Boucle d'oreille en turquoise Bonampak Chambre 2 mur sud, pers 64		Boucle d'oreille en turquoise Chichen Itza Pyramide Mesas, pilastre sud
Boucle d'oreille en jade Bonampak, Chambre 2 mur est, pers 10	Boucle d'oreille en jade Chichen Itza Pyramide Monjas, Chambre 22	Bracelet en jade Palenque Temple 19, stèle du musée
Coiffe d'apparat en plumes Bonampak Chambre 3 mur sud, pers 15	Coiffe en plumes Chichen Itza Temple inférieur des jaguars	Coiffe en plumes Palenque Temple 17, stèle du musée

Légende de la figure ci dessus

# 2

## Code de la couleur ?

Au cours de notre voyage dans l'aire maya nous avons pu nous rendre compte de la présence d'éléments iconographiques importants qui aident à la lecture des œuvres. Ces éléments sont les coiffes ou plus exactement les plumes qui ornent ces coiffes, les parures de jade ou de turquoise, ou encore la couleur du fond de certaines scènes. Ces éléments sont communs à tous les sites du classique tardif et semble être peint avec un couleur qui leur est spécifique. Y aurait-il alors un code des couleurs ?

Le choix des tonalités fait bien sur appel à une volonté de représenter la nature, le jade est vert et la turquoise bleu turquoise, mais probablement que l'utilisation de certaines couleurs est aussi conceptuelle.

### 1) Bonampak : une riche palette de couleurs

Bonampak est le site qui offre la plus grande variété de couleurs pour la représentation des plumes (coiffes ou vêtement) et des bijoux en jade ou en turquoise. Nous avons remarqué beaucoup plus de détails et de variations colorées par l'utilisation de multiples superpositions. Dans les autres sites l'utilisation des couleurs est plus uniforme : une couleur pour chaque élément et pas de superposition. L'étude de Magaloni a permis de définir pour Bonampak, la composition des couleurs et leur nom maya :

Couleur	Pigment <sup>3</sup>	Nom en maya	Traduction
Bleu gris fond	Malachite + albite	<i>Yaxnak</i>	Ciel nuageux
Bleu maya	Palygorskites + indigo	<i>Yax</i>	Bleu-vert
Bleu moyen	Bleu maya (superposition)	<i>Yax</i>	
Bleu d'eau 1 fond	Bleu maya + azurite	<i>Yaxkab</i>	Bleu turquoise clair
Bleu d'eau 2 fond	Bleu maya + malachite	<i>Yaxkab</i>	
Bleu marine coiffe	Bleu maya foncé + hématite dessous ou charbon dessus	<i>Eekzamen</i>	Ciel de nuit (« entre deux lumières »)
Vert maya	Sépiolite + colorant organique vert	<i>Yax</i>	Bleu-vert
Vert émeraude	Vert maya en superposition		
Vert sec foncé végétal	Vert maya + limonite	<i>Yaxacan</i>	
Vert sec clair végétal	Vert maya + limonite	<i>Yaxkin</i>	Champs par temps de sécheresse
Vert jaune	Vert maya + colorant organique jaune		
Vert jade	Bleu maya + vert maya + colorant jaune organique fixé sur argile	<i>Yax k'uk'ul</i>	Vert précieux et fin
Vert quetzal coiffe	Clair : bleu maya + vert maya Foncé : bleu marine + vert maya	<i>Yax k'uk'uk</i>	Vert qui tire au bleu

Tableau XIX : Couleurs, compositions, nom maya et traductions des tonalités bleues et vertes de Bonampak

<sup>3</sup> Le premier pigment mentionné correspond toujours à la dernière couche superposée

Chaque tonalité possède donc une dénomination qui lui est propre. Nous avons conservé cette nomenclature pour tous les sites étudiés.

## 2) Comparaison des couleurs de certains éléments iconographiques au classique : Bonampak et Chichen Itza

La comparaison des palettes chromatiques entre les sites n'est pas aisée. L'état de conservation des peintures ou des stèles polychromes des autres sites archéologiques n'est pas très bon. Parfois, il est impossible de savoir à quels éléments iconographiques se réfèrent les couleurs que nous mesurons. C'est le cas des peintures murales de Chacmultun et Palenque. Les stèles de Palenque ne conservent de la polychromie que le bleu des plumes de la coiffe et du « sceptre ». L'iconographie de Calakmul est basée sur l'inframonde aquatique et ne présente pas d'éléments de comparaison comme les plumes ou les bijoux. Seules les tonalités peuvent être comparées. Finalement c'est le site de Chichen Itza qui possède une gamme colorée assez importante pour faire l'étude comparée des éléments iconographiques de type plumes et bijoux avec le site de Bonampak.

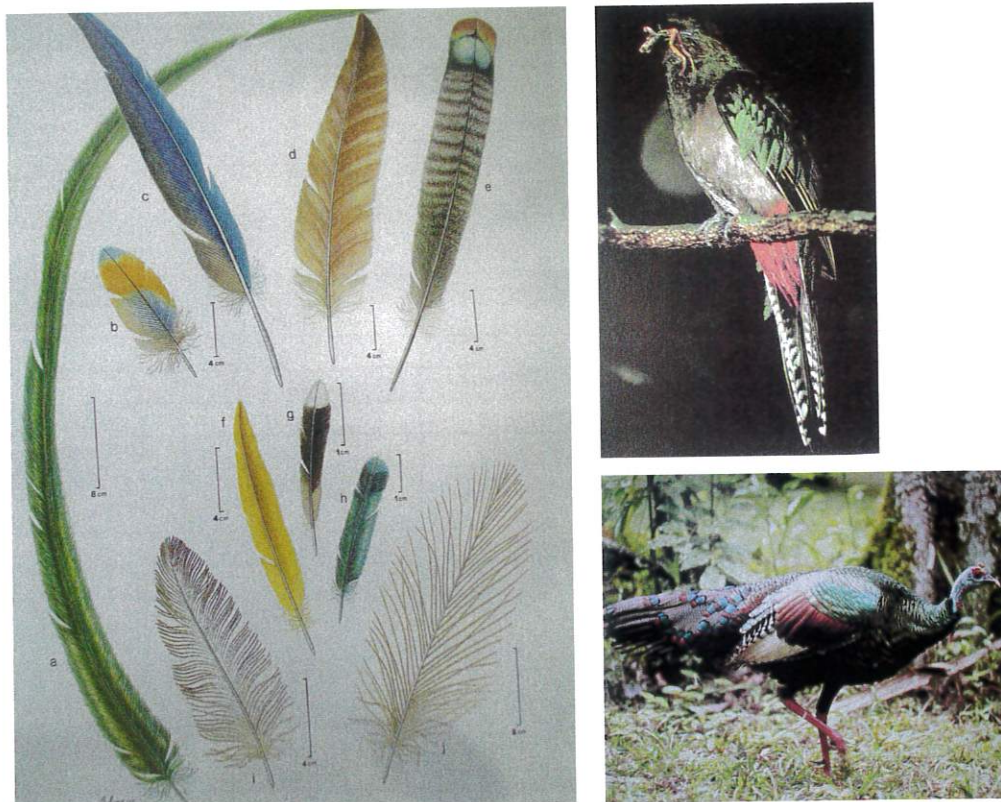


Fig. 64 : Plumes utilisées pour les coiffes mayas : a) plumes caudale de quetzal, b) et c) plumes de guacamaya, e) plumes d'ocelado

© dessin Albino Luna

Fig. 65 et 66 : Quetzal (haut) et ocelado (bas)

© photos Fluvio Eccardi

## Les coiffes

Elles permettent de reconnaître le niveau de hiérarchie du personnage qui la porte. Les plumes de ces coiffes de facture complexe pouvaient provenir de 14 espèces différentes d'oiseaux selon Sahagun. Les coiffes les plus volumineuses étaient réalisées avec des plumes de quetzal et les plumes caudales des « *guacamayas* ». Celles qui utilisaient les plumes bleues de la « *garga* », oiseau sacré des mayas, étaient réservées aux gouvernants. Les plus petites ne contiennent qu'une plume caudale de quetzal ou bien quelques plumes du « *pavo ocelado* ». Ces coiffes servaient donc à distinguer les nobles, les guerriers, les chefs des autorités religieuses et politiques.

Elles symbolisaient la richesse, le pouvoir et le caractère sacré des personnages. D'ailleurs le verbe *quetza* en nahuatl signifie « se lever », ici de manière conceptuelle le port de ces coiffes permettait de s'élever. Les coiffes étaient le véhicule de communication avec le spirituel<sup>4</sup>.

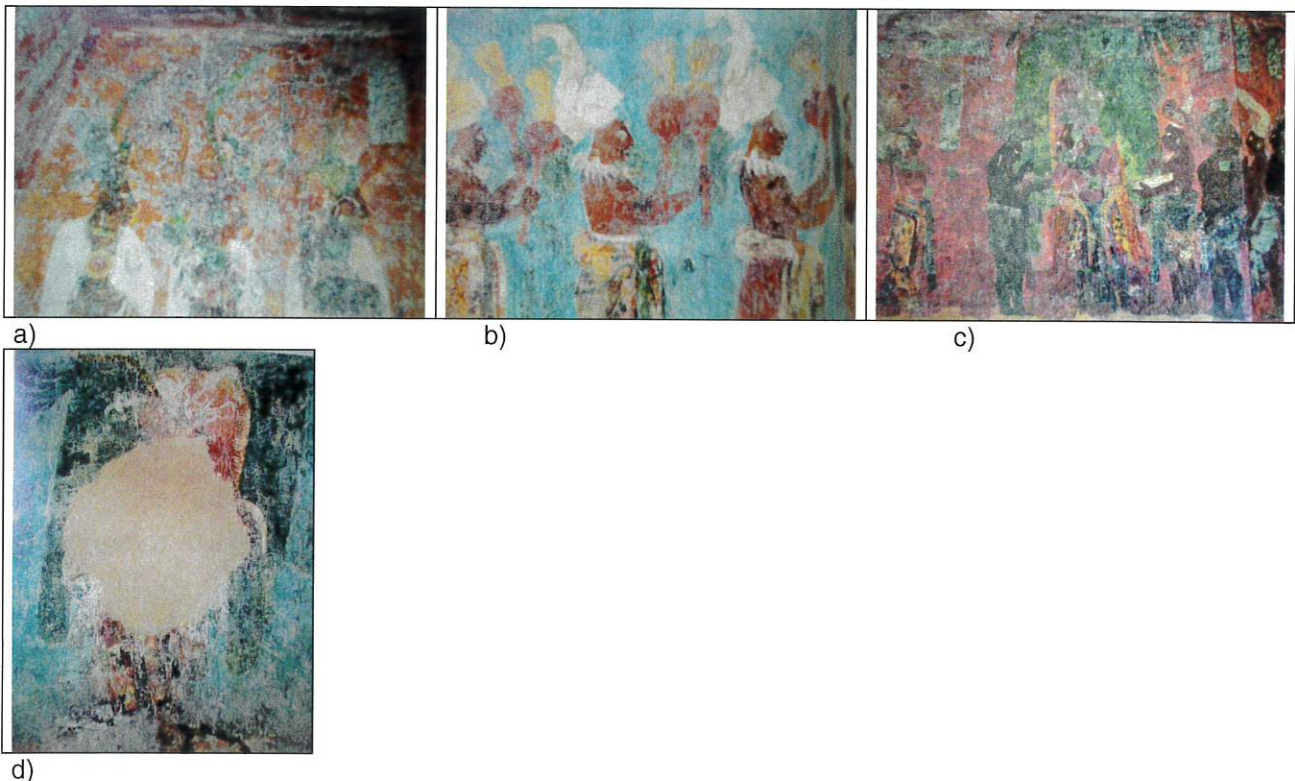


Fig. 67 : Types de coiffes de la chambre 1. a) mur est registre 2 ; b) mur est registre 4 ; c) mur nord registre 2 ; d) mur sud registre 4

<sup>4</sup> *La pintura mural prehispánica en México : Plumas, tocados : una vieja historia de identidad perdidas.* / DE LOURDES NAVARIJO ORNELAS, M. México : éd Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM : II, 2001, p. 177-191.



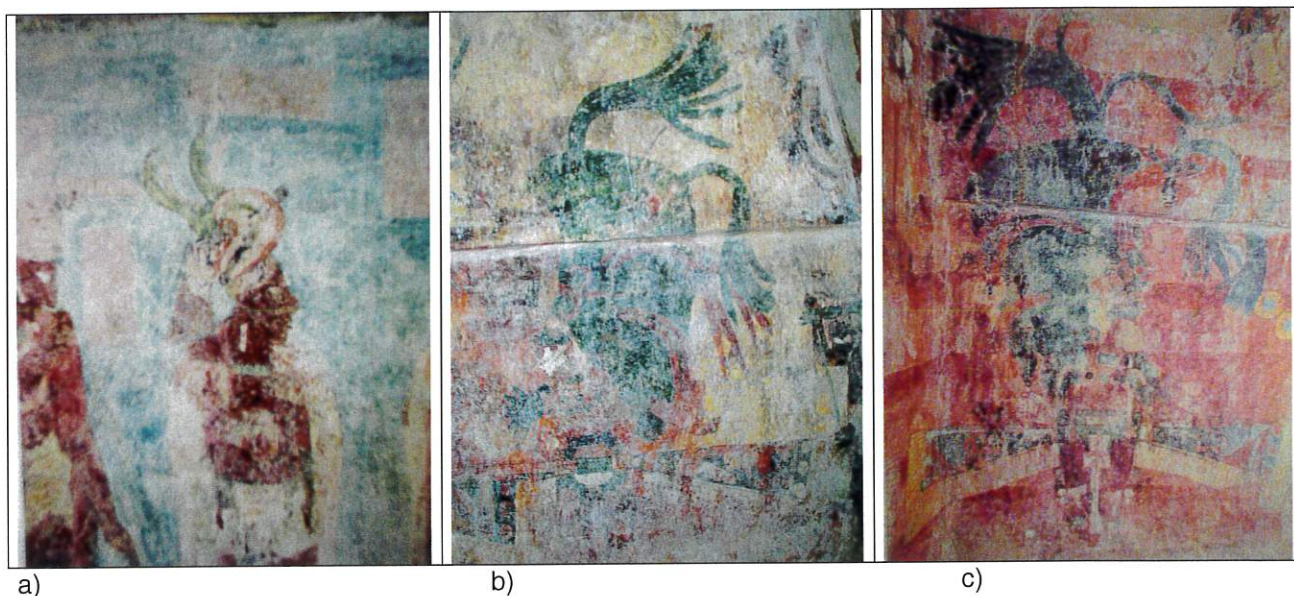
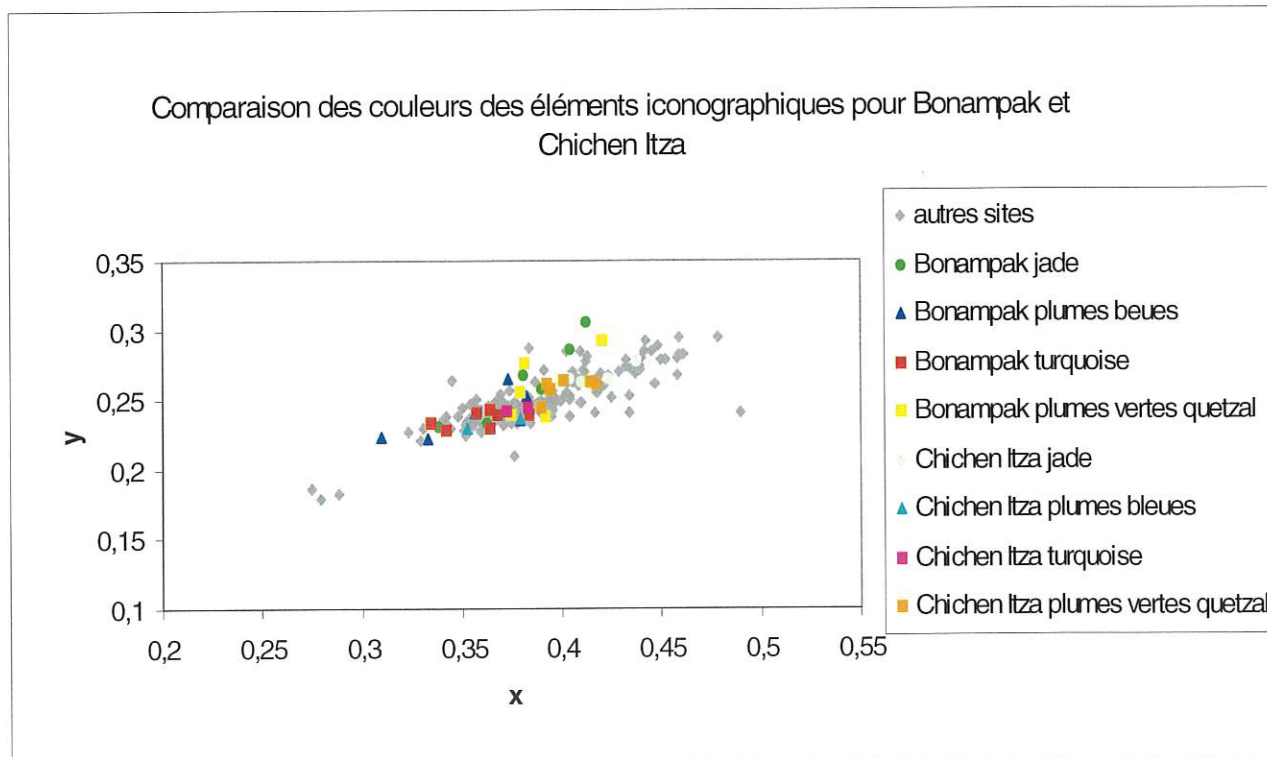


Fig. 68 : Types de coiffes de la chambre 3. a) mur est registre 2 ; b) mur sud registre 2 ; c) mur sud registre 3

On distingue trois tonalités bleu--vert utilisées pour peindre les coiffes.

Sur le graphique elles sont visibles dans trois zones différentes : à gauche, les bleus foncés « marine » (triangles bleus) ; au milieu les verts bleus (carrés jaunes et triangles bleus) « quetzal foncé » et à droite, les verts »quetzal clair« (carrés jaunes).



Pour Chichen Itza les plumes bleues sont rares et elles sont différentes de celles de Bonampak. D'ailleurs Magaloni a trouvé une composition différente : l'argile utilisée serait de la kaolinite. Les plumes vertes de Chichen Itza et de Bonampak semblent également différentes. Le vert quetzal aurait-il disparu de la palette à Chichen Itza ?

Il faut dire que les points correspondants aux coiffes de Chichen Itza appartiennent à une époque plus tardive que Bonampak, et le style est différent. Ces résultats ne sont pas étonnants.

Proposons une autre hypothèse : les oiseaux du Yucatán ne sont pas ceux du Chiapas et par conséquent les coiffes étaient réalisées à l'aide de plumes de couleurs différentes comme celles de l'oiseau *toc* ou *reloj*.



Fig. 69 : Plumes de l'oiseau *Toc* du Yucatán

## Le jade et la turquoise

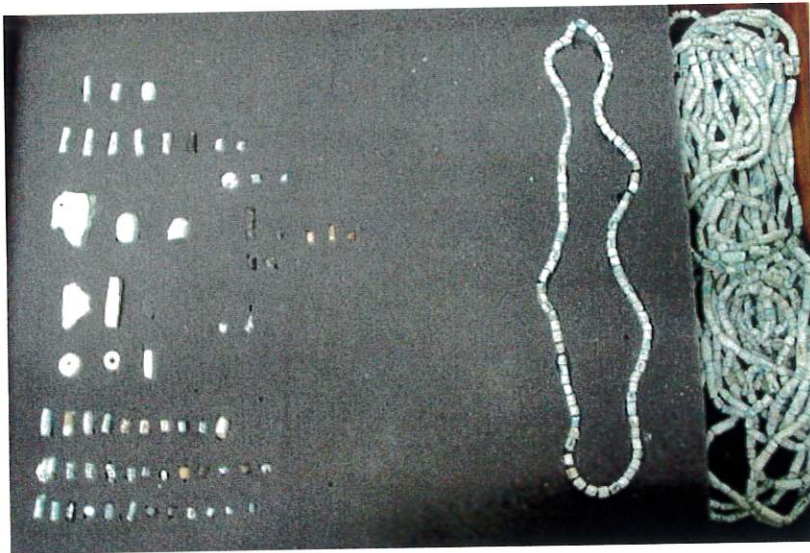
A Chichen Itza, le jade et les plumes vertes sont dans la même zone du graphe, il ne semble pas y avoir de réelle différence chromatique. Les peintres utilisaient-ils alors la même couleur sans distinction ?

Pour Bonampak c'est un peu différent car il n'y a pas un groupe de points visible. Le vert quetzal et le vert jade sont proches, leur composition de base est similaire (bleu maya + vert maya) mais il y a plusieurs techniques de superpositions de couleurs ce qui expliquerait les différences entre les points.

En ce qui concerne la représentation de la turquoise : deux tonalités sont présentes à Bonampak, l'une étant plus saturée (superposition ?).

A Chichen Itza, il n'y a qu'une seule couleur turquoise plus claire (valeurs de Y% supérieure à celles de Bonampak) qui correspond à la représentation des ornements de coiffes, boucles d'oreilles, pectoral et boucliers des pilastres de la pyramide des guerriers. Le jade n'est alors plus représenté.

Les chemins commerciaux du jade existaient-ils toujours au Yucatán ? La valeur symbolique de cette pierre était elle toujours d'actualité ?



Nous n'apporterons pas de réponse à ces questions mais un élément peut nous éclairer : lors de fouilles archéologiques de nombreux collier de perles en terre peinte avec du bleu maya ont été découvertes. La turquoise n'était peut-être pas acheminé au Yucatán , et le bleu maya (et sa valeur symbolique ?) suffisait à la remplacer. Ce que nous voyons sur ces pilastres, ce n'est peut-être pas la représentation de turquoise mais celles de perles peintes avec du bleu maya ?

Au vu de ces résultats, nous pouvons surtout nous rendre compte de l'évolution de l'utilisation et de la nature des pigments bleus et verts mayas. Un code des couleurs existe bien à Bonampak, mais on ne peut pas dire qu'il ait été suivi par les artistes des autres sites de même époque ou postérieure.

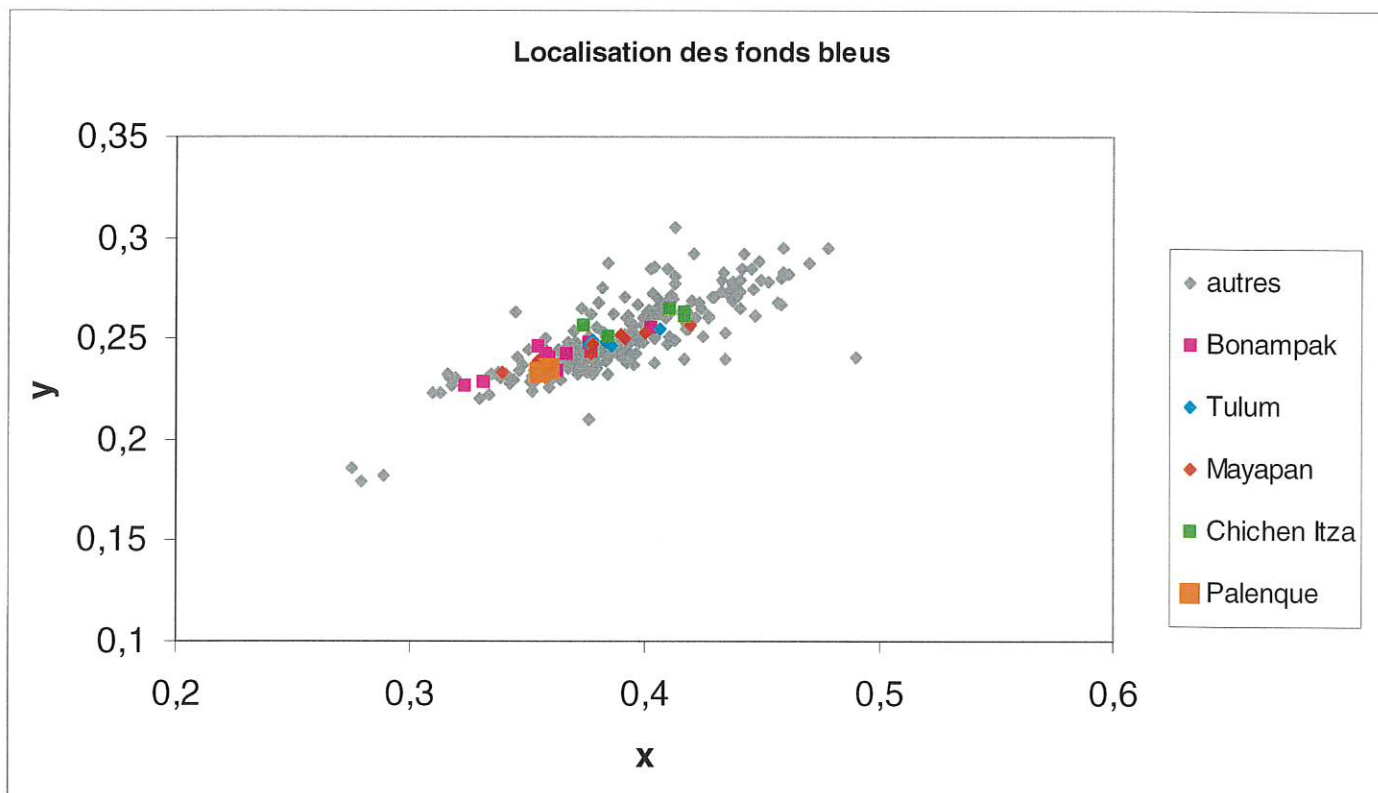
Que pouvons nous dire des fonds bleus ?



Fig. 70 : Colliers de perles peintes avec du bleu maya découvertes lors de fouilles à Chichen Itza. Pilastre du Temple de Chac mool, Chichen Itza, Guerrier orné de bijoux d'apparat.  
© photo Sonia Ovarlez

### 3) Comparaison des couleurs associées au fonds bleus du classique et du postclassique

L'utilisation de fonds bleus est vérifiée dans les peintures murales<sup>5</sup> de tous les sites étudiés sauf pour Calakmul. Comparons sites classiques et postclassiques<sup>6</sup>.



Données non corrigées

La gamme est étendue. Elle n'est pas localisée à une zone identique pour tous les sites.

Il y a plusieurs tonalités de bleus pour un même site<sup>7</sup>, notamment pour Bonampak, Mayapan et Chichen Itza. Pour Mayapan et Chichen Itza ces différentes tonalités correspondent à des époques différentes, ; pour Bonampak c'est plutôt une utilisation volontaire de bleus distincts pour signification particulière.

Voyons cela plus en détail :

<sup>5</sup> Les pilastres (Chichen Itza) possèdent un fond rouge et non un fond bleu.

<sup>6</sup> Pour ne pas surcharger le graphique nous avons décidé de ne pas mettre les valeurs de Xel-ha et Rancho Ina. Les points correspondant à Tulum sont représentatifs des sites de la côte orientale.

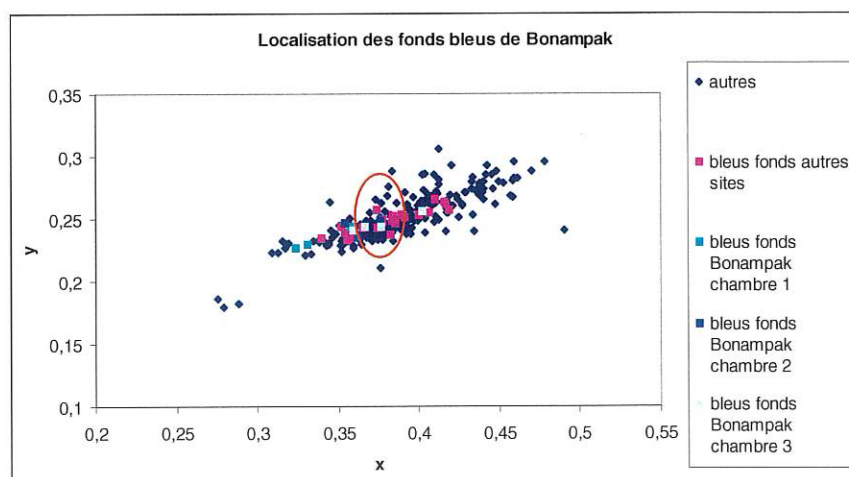
<sup>7</sup> En ce qui concerne Palenque, nous ne pouvons rien dire, le nombre de mesure est trop faible soit à cause du mauvais état de conservation des peintures.

## Bonampak : utilisation d'un code symbolique ?

Nous avons répertoriés pour chaque chambre deux bleus différents comme le montre les illustrations de la page ci-contre et le graphique suivant. Pour la chambre 1, c'est un bleu maya intense qui sert de couleur de fond à la scène des musiciens du registre inférieur (registre 3). La photo du milieu est un détail de ce bleu. Le deuxième bleu est un peu moins saturé, on le trouve au niveau du registre 1 en haut (photo de droite). La chambre 2 possède un fond bleu foncé pour la scène de bataille (photo de droite) et un plus clair et plus vert pour la scène du sacrifice des prisonniers (photo du milieu). Ce dernier se trouve également dans la chambre 3 dans la scène des fêtes (photo du milieu). Un bleu gris est utilisé pour le fond du groupe de spectateurs (photo de droite).

Le graphique de localisation des fonds bleus de Bonampak montre que les bleus clairs des chambre 1 (registre du haut), 2 et 3 sont en fait une même couleur. Les points les plus excentrés à gauche sont le bleu intense de la chambre 1 (registre 3) et celui le plus à droite correspond au bleu gris de la chambre 3. Les fonds de Bonampak ont donc été peints à l'aide de quatre bleus différents : un bleu intense<sup>8</sup>, un bleu vert plus clair<sup>9</sup> (encerclé de rouge), un bleu foncé<sup>10</sup> et un bleu gris<sup>11</sup>. Chacune de ces couleurs fait référence à un contexte particulier dans lequel se déroule la scène. Probablement que le bleu maya intense de la chambre 1 est à mettre en relation avec la représentation du caractère sacré de la scène : un rituel de purification où sont présents les dieux dont le dieu du maïs.

La chambre 2 met en scène une bataille sur fond bleu foncé pour signifier la tombée de la nuit ou le levé du jour, moments auxquels les mayas avaient pour coutume de lancer leurs attaques guerrières. Le bleu plus clair était alors utilisé pour signifier le jour : le moment de la victoire et de la soumission des vaincus. Le bleu gris sert de fond à la scène de la soumission des vaincus dans la chambre 3. Pour eux ce jour est « nuageux » selon la traduction littérale maya *yaxnak*

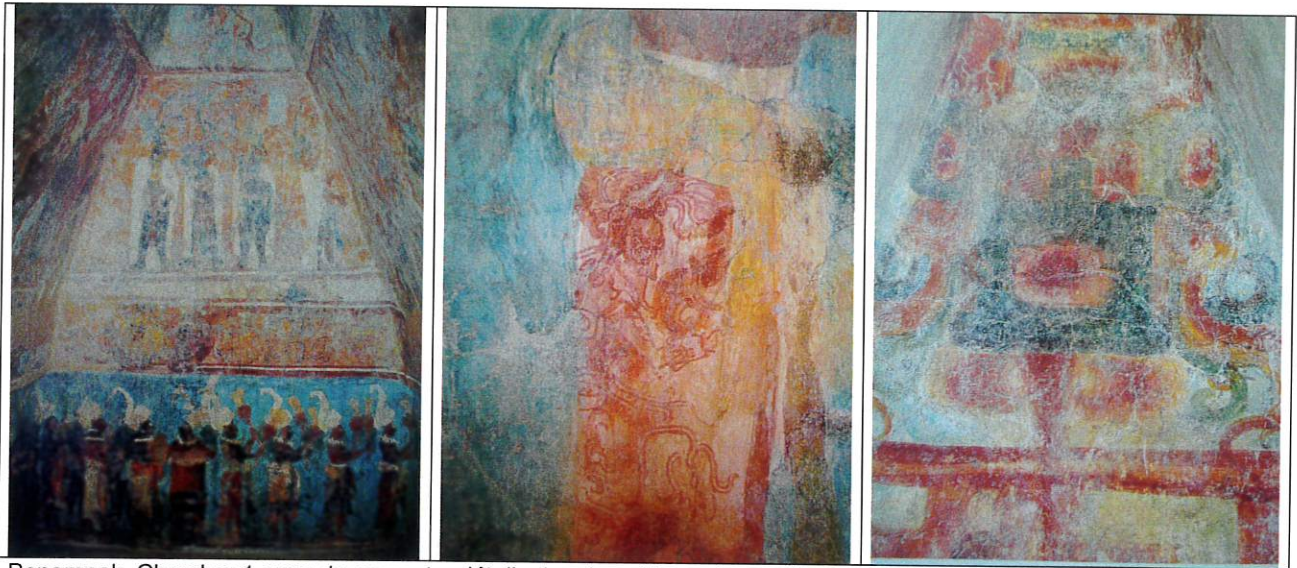


<sup>8</sup> bleu maya + azurite d'après les analyses de Magaloni

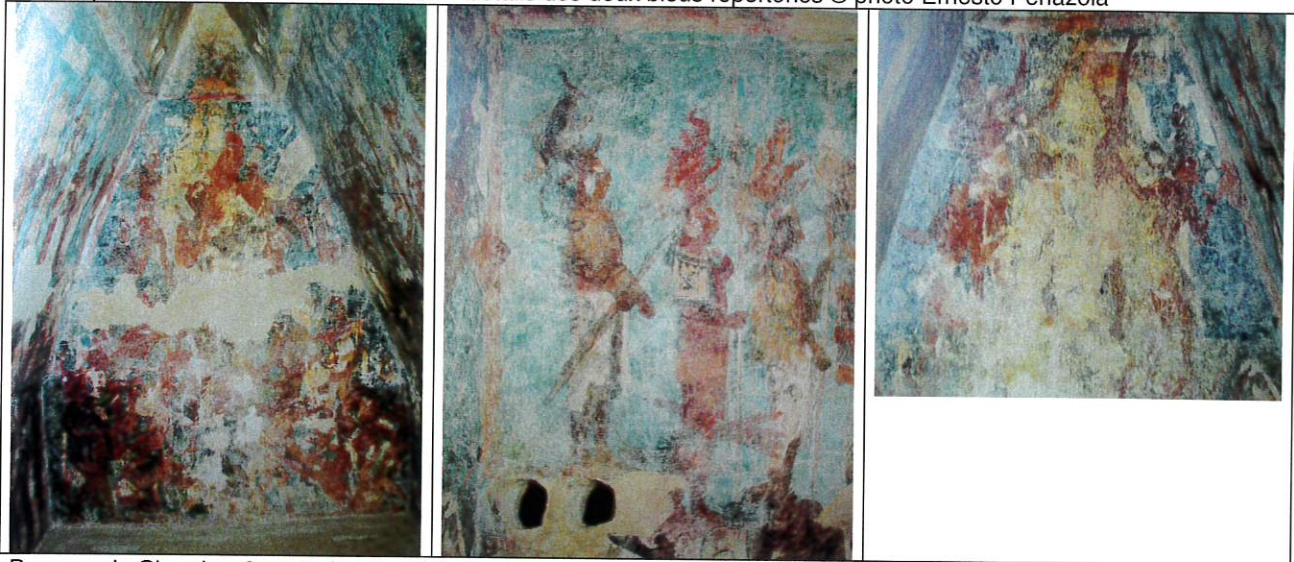
<sup>9</sup> bleu maya, id.

<sup>10</sup> bleu maya + hématite, id.

<sup>11</sup> malachite + albite, id.



Bonampak, Chambre 1 : vue du mur est – détails des deux bleus répertoriés © photo Ernesto Penazola



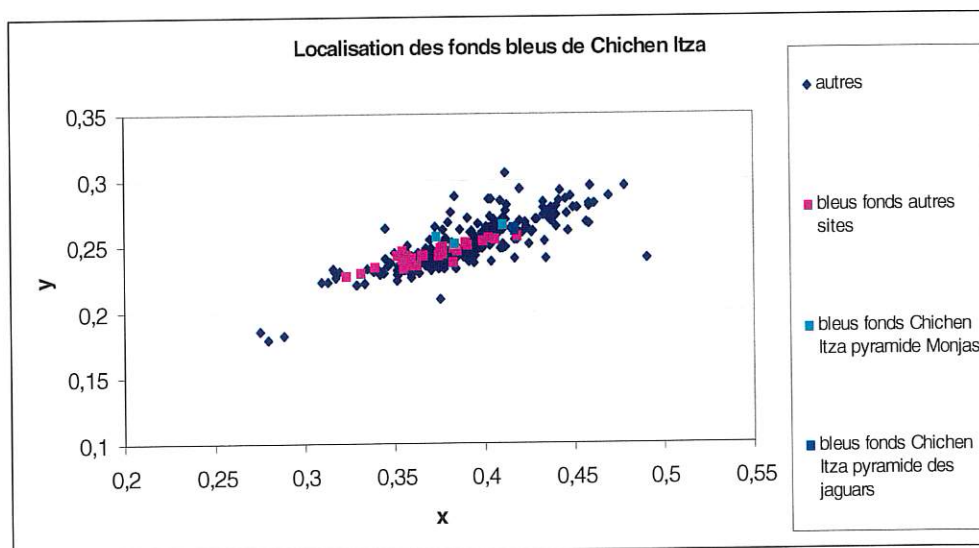
Bonampak, Chambre 2 : vue du mur est – détails des deux bleus répertoriés © photo Ernesto Penazola



Bonampak, Chambre 3 : vue du mur ouest – détails des deux bleus répertoriés © photo Ernesto Penazola

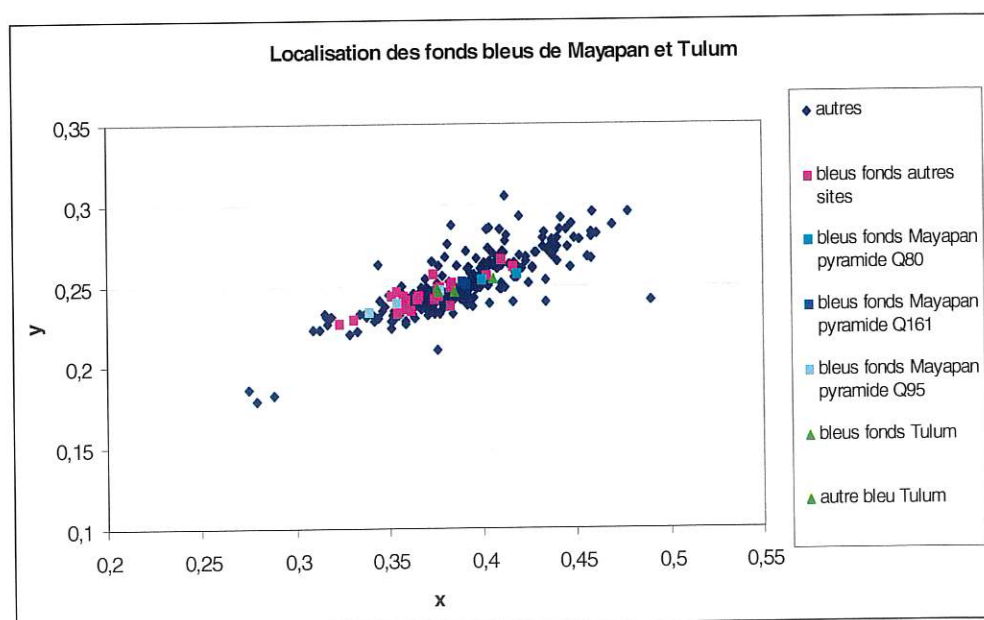
Fig. 71 : Fonds bleus des chambres à Bonampak

Deux couleurs bleues sont présentes dans les peintures murales de la pyramide « Monjas » de Chichen Itza : un bleu vert qui d'après le graphique semble proche de celui de Bonampak et un bleu plus clair. Ce dernier se retrouve dans la pyramides des Jaguars (Chichen Itza) d'époque plus tardive. Là il n'y a que ce bleu. Il semble que la palette diminue.



Données non corrigées

A Mayapan, les peintures murales de trois des pyramides du site ont été étudiées. Le décor de la pyramide Q95 est considérée comme le plus ancien par son style. C'est d'ailleurs là que l'on trouve le plus de tonalités bleues, avec un bleu saturé qui se retrouve dans la même zone que ceux de Bonampak. Les points situés plus à droite appartiennent aux pyramides Q161 et Q 80, le bleu est alors beaucoup moins saturé et ressemble au bleu du postclassique tardif de Tulum.



Données non corrigées

Finalement ces résultats, nous font rester prudent qu'à l'affirmation qu'il existe un code de la couleur. La mise en situation de la couleur et des contrastes de couleurs donnent de nombreuses nuances visibles à l'œil nu, mais toutes ces nuances varient d'un site à l'autre. Apparemment elles seraient dues à des techniques de superpositions différentes et peut-être aussi à l'utilisation d'argiles différentes, ce qui paraît être le cas surtout dans des régions différentes. Mais gardons également à l'esprit que cette infinité de nuances peut également provenir d'artefacts dû à la conservation des peintures murales. Cette étude continue et sera approfondie avec les valeurs corrigées traitées dans l'espace CIELAB, afin de voir si les différences de couleur visibles dans l'espace CIE 1931 sont significatives ou non. Nous pourrions alors peut-être nous prononcer.

A Bonampak il y a bien un langage de la couleur qui renvoie à une conception symbolique de monde maya. Mais pour les autres sites il semble qu'il y ait une adaptation, une évolution de ce « langage ».



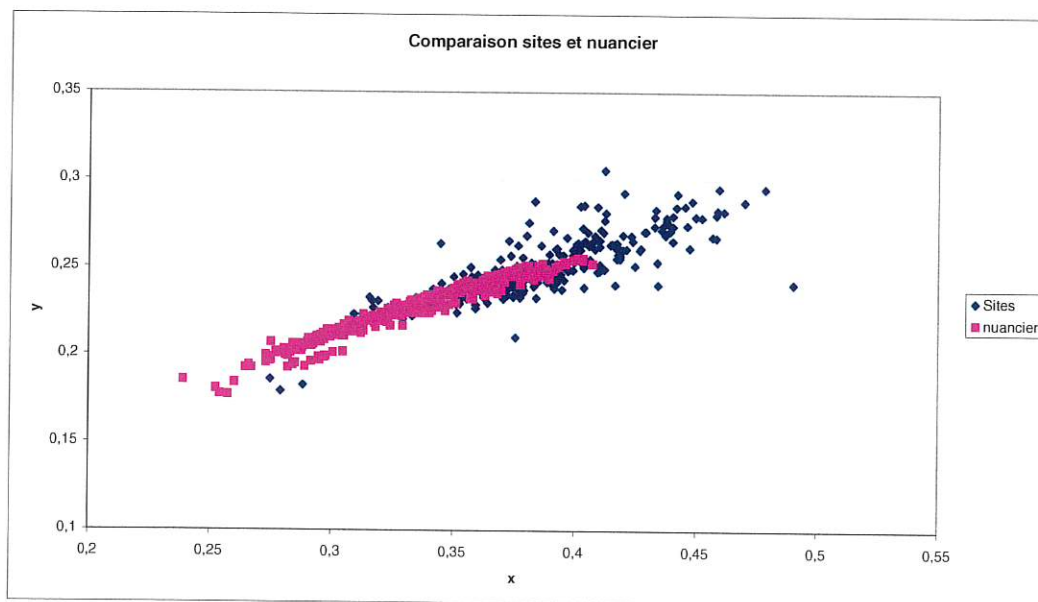


# 3

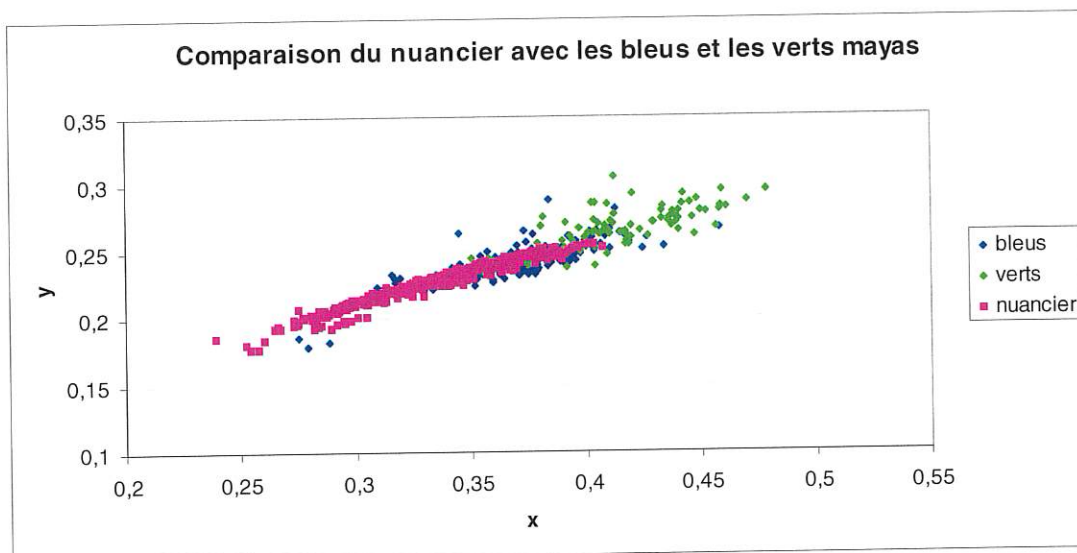
## Comparaison des bleu-vert mayas avec le nuancier

Nous n'utiliserons ici que l'espace de représentation des couleurs CIE 1931. Cette étude commence à peine et sera approfondie lorsque les données numériques seront corrigées. Cette première approche servira de base de travail lors de notre prochaine collaboration avec le Mexique. Ces résultats ne sont donc pas définitifs. Nous resterons prudents pour l'interprétation des résultats pour deux raisons : premièrement, les couleurs mesurées sur les sites sont probablement moins saturées qu'elles ne l'étaient lors de la réalisation des peintures. Même si nous avons pris le soin de mesurer des couleurs présentant un bon état de conservation, nous devons garder à l'esprit que la comparaison est relative. De plus, nous mesurons des poudres pour le nuancier et l'ensemble pigment - liant pour les sites archéologiques.

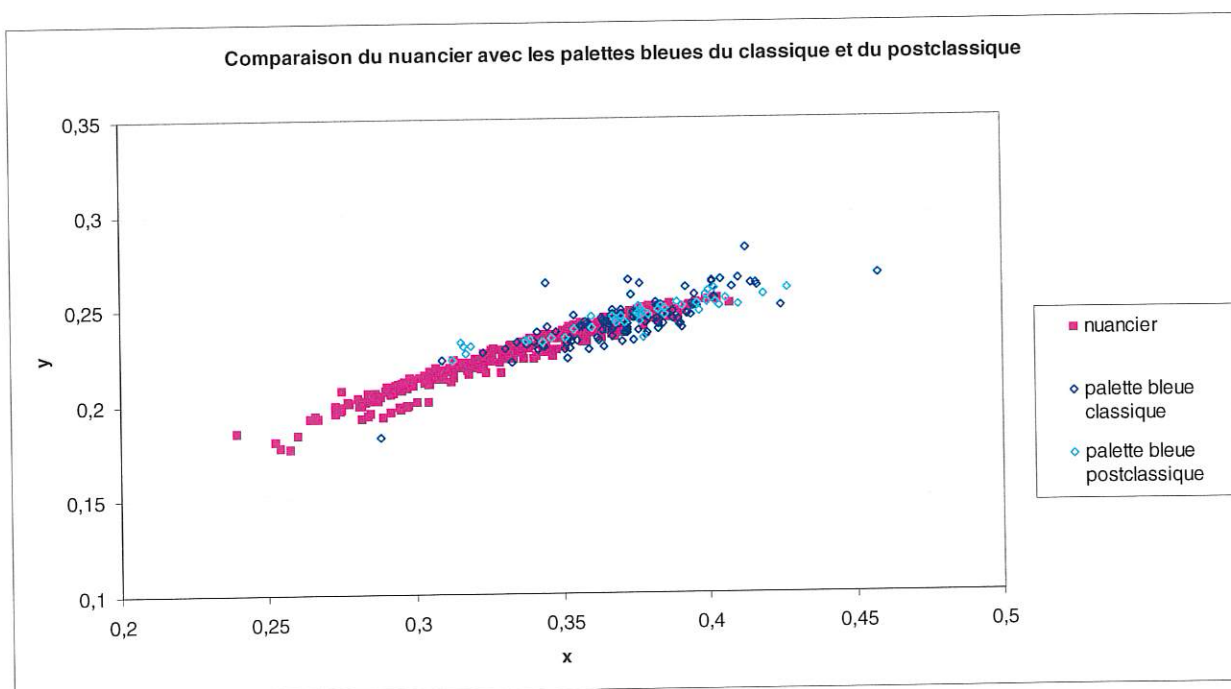
Essayons de voir quelles tonalités du nuancier se retrouvent dans la gamme colorée des bleus verts utilisés par les artistes mayas :



Ce premier graphique montre qu'une grande partie des couleurs du nuancier se superpose aux couleurs rencontrées dans les sites. En fait, le nuancier n'englobe pas les verts mayas comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous.



Ce résultat était prévisible puisque notre nuancier est composé de bleus mayas (indigo + argile) et non pas de verts mayas (colorant vert non identifié + argile).

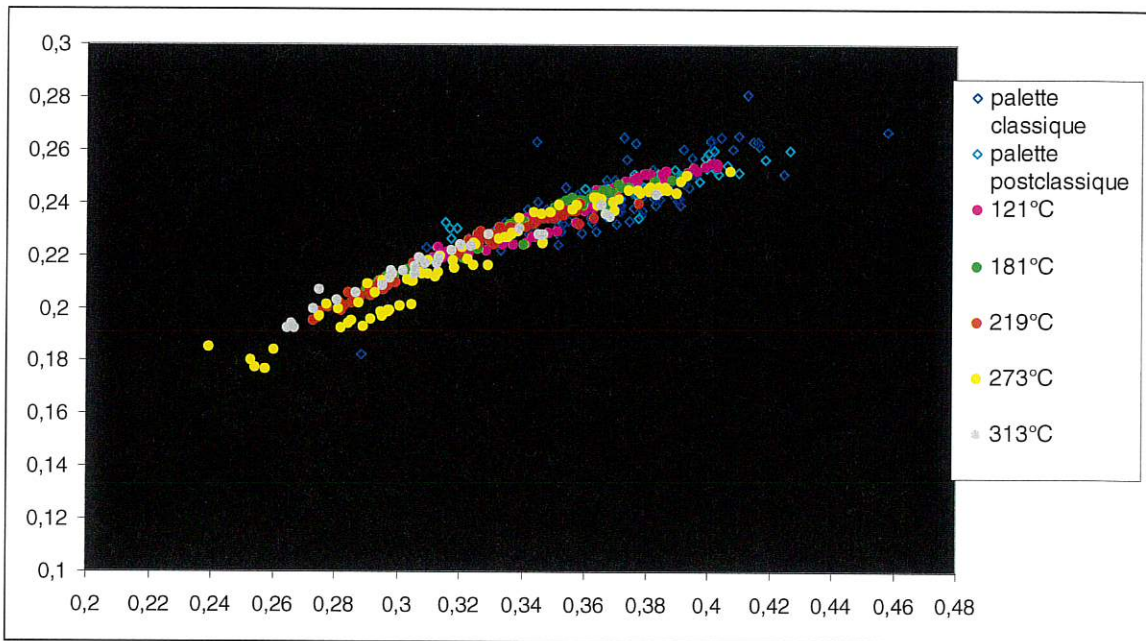


Le nuancier englobe la quasi totalité des bleus mayas de l'époque classique et postclassique. Les points que n'englobe pas le nuancier sont majoritairement des couleurs de l'époque classique qui sont issues de superpositions de couches colorées. Celles-ci ne peuvent être réellement comparées avec les couleurs du nuancier constituées de pigments purs. La palette de l'époque postclassique met en œuvre des

techniques picturales plus simples, en général une couche de pigment pur. Celle-ci est donc plus facilement superposable avec le nuancier.

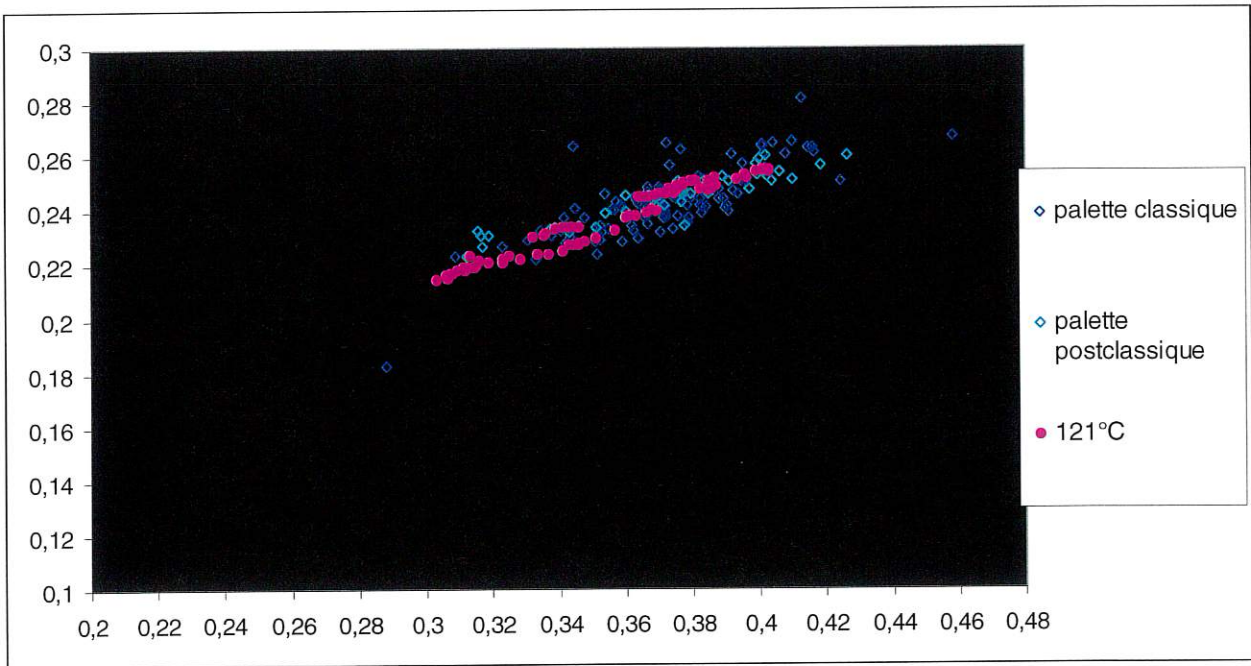
Cent trente-cinq tonalités du nuancier ne se retrouvent pas dans la palette du peintre maya. A quoi correspondent ces tonalités ? Quel sont les paramètres qui peuvent être exclus pour la fabrication du pigment ? Enfin quelles sont les recettes les plus plausibles ?

Tout d'abord la température :

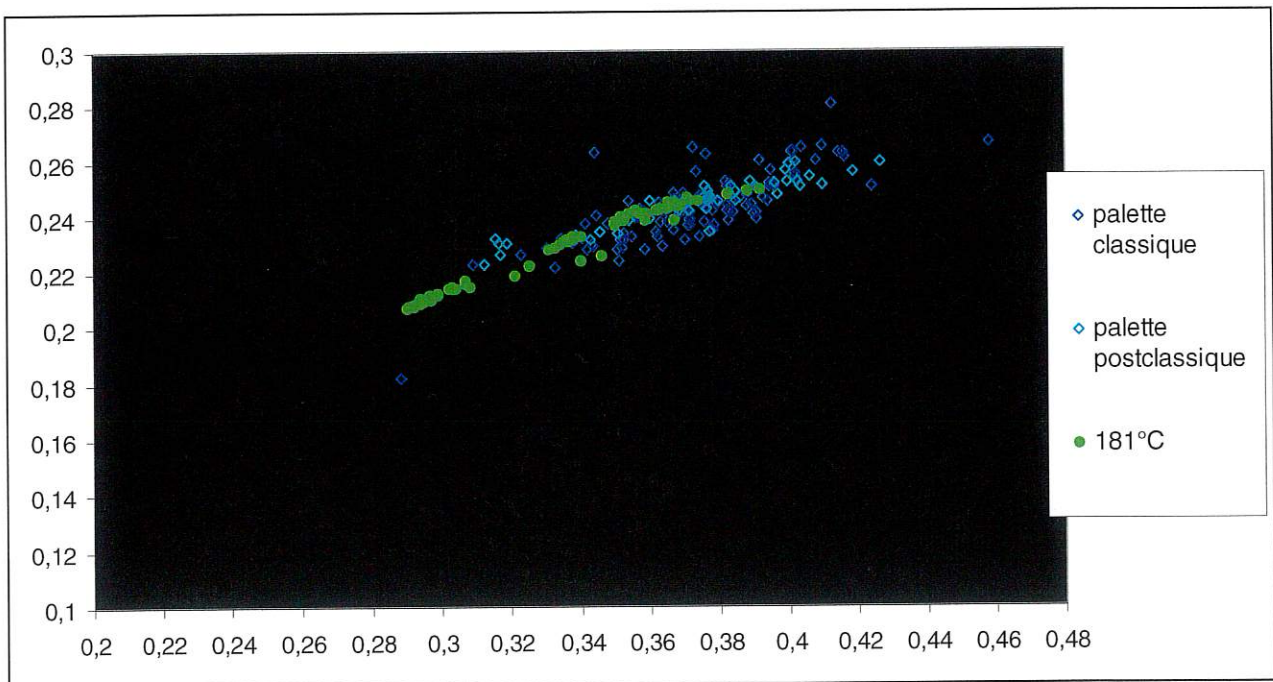


- Les bleus mayas artificiels dont les températures de cuisson sont 219, 273 et 313°C sont en grande majorité exclus de la zone des bleus mayas archéologiques.

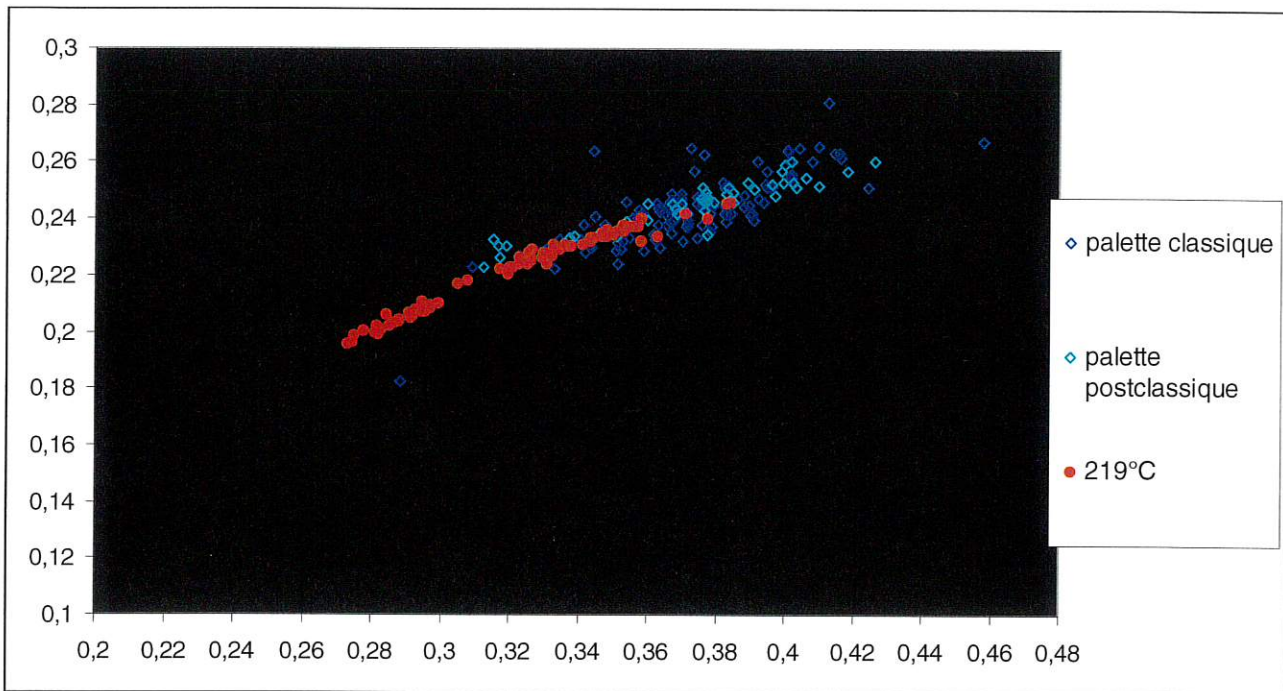
L'étude du nuancier montre que ces températures se trouvent après la température seuil de 181°C où la couleur du pigment est stable. La couleur des bleus mayas cuits à des températures supérieures se dégrade d'autant plus que la durée de cuisson augmente. La palette du peintre maya ne contient donc pas ces couleurs dégradées, plus foncées et « grises » issues de durées de cuisson supérieures à trois minutes (cf. chapitre 2). Pour illustrer nos propos, regardons plus en détail la superposition des couleurs des pigments artificiels et archéologiques en fonction de chaque température de cuisson (graphiques ci-contre).



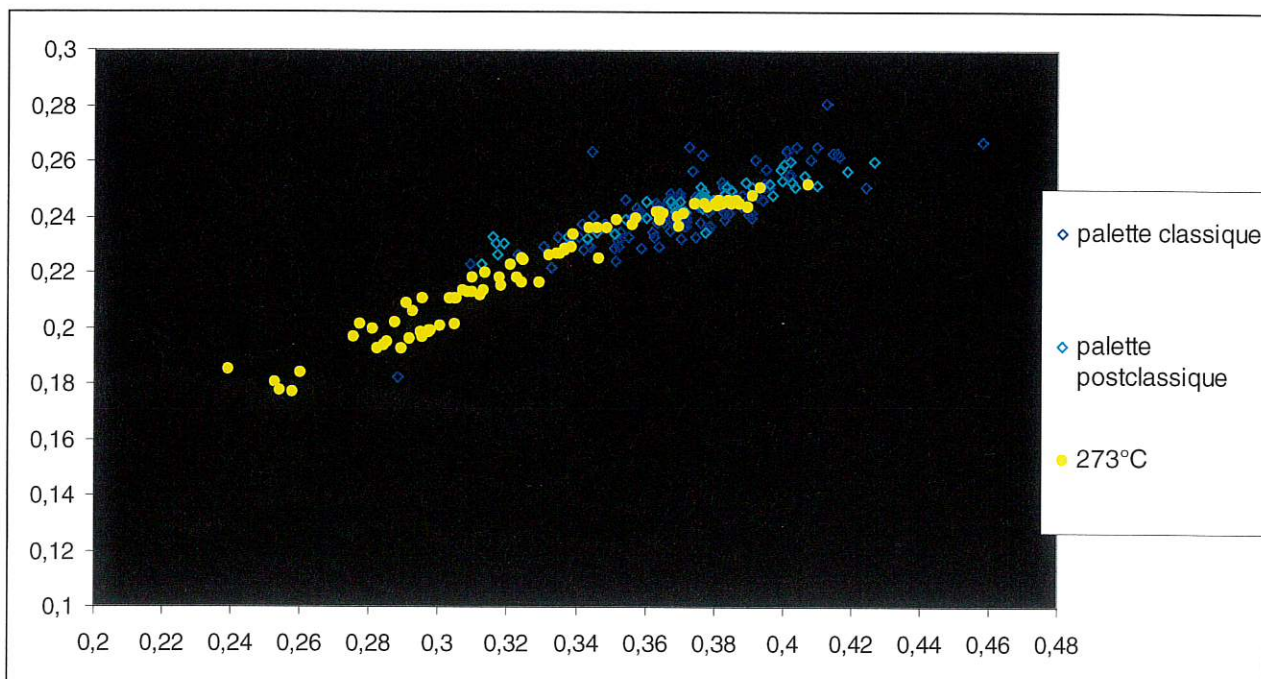
Les couleurs des bleus mayas cuits à 121°C, sont comparables à celles des peintures murales mayas, surtout de l'époque postclassique.



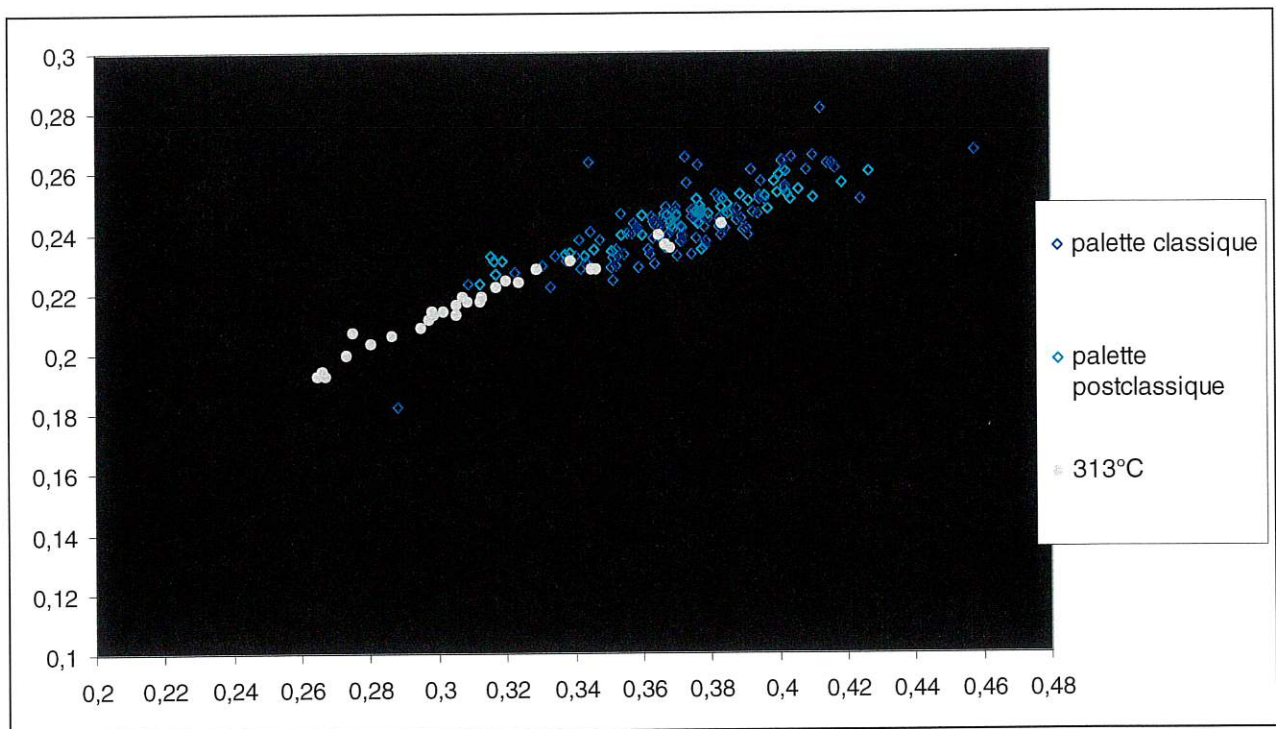
La même remarque peut être faite pour la série de pigments cuits à 181°C



A partir de 219°C, une partie des bleus mayas artificiels ne se retrouve plus dans la gamme de couleurs utilisée par les artistes mayas.



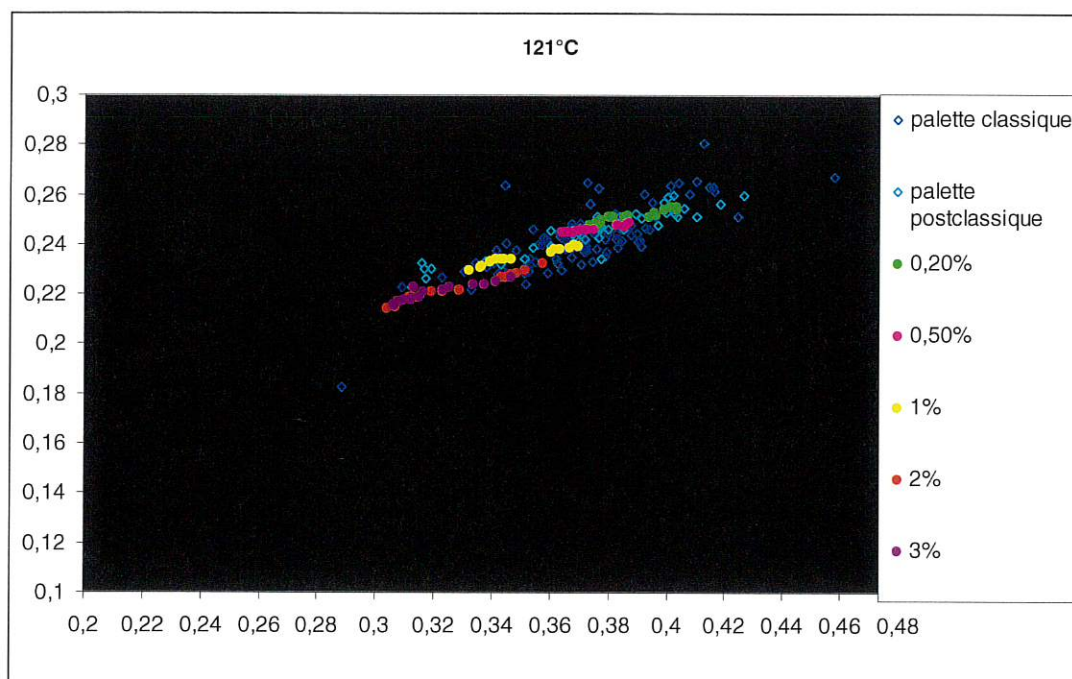
Plus la température augmente plus le phénomène s'accroît.



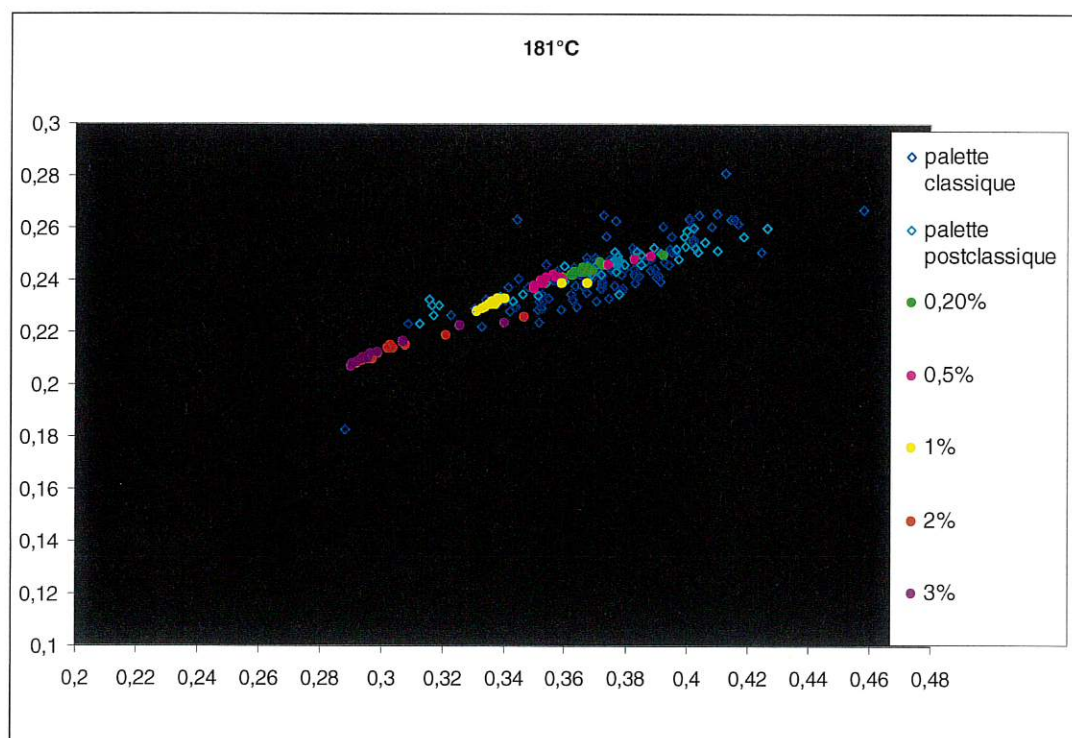
Finalement, seule une dizaine de pigments cuits à 313°C pourraient correspondre à la palette maya. Leurs valeurs se superposent cette fois plus à la palette classique.

En résumé l'utilisation de hautes températures (supérieures à 200°C) pour la fabrication du bleu maya se limite à l'obtention de quelques tonalités bleues saturées.

Que pouvons nous dire du pourcentage d'indigo ?

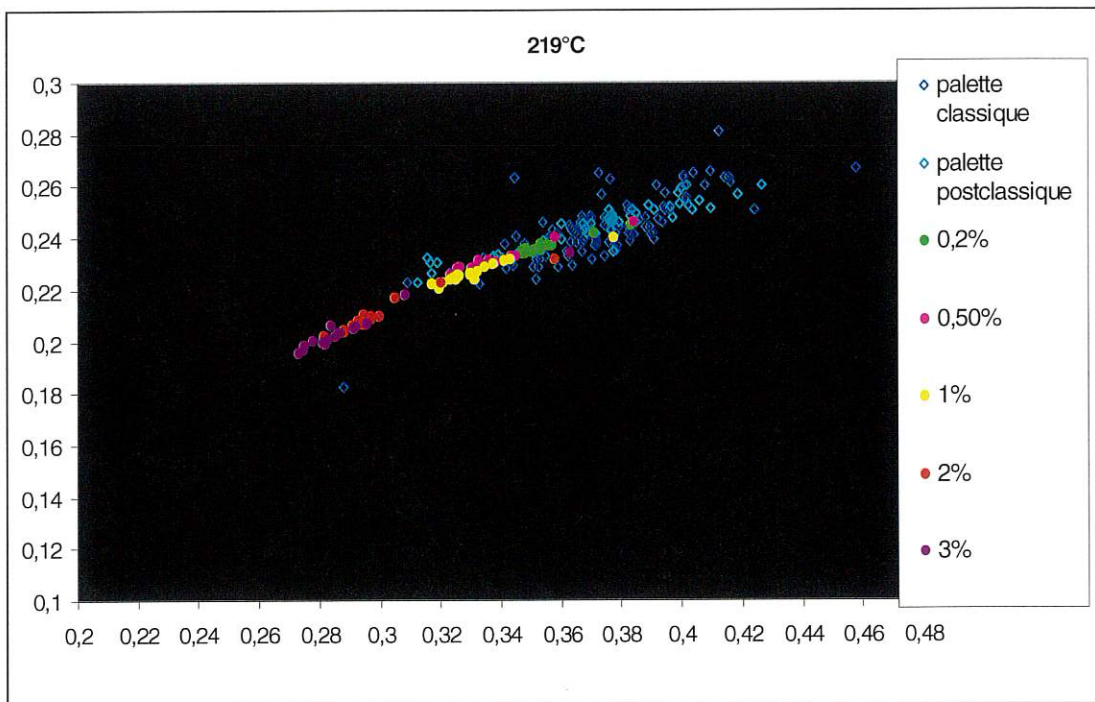


Tous les pigments de la série à 121°C, sont compris dans la palette maya quel que soit le pour-cent en indigo.

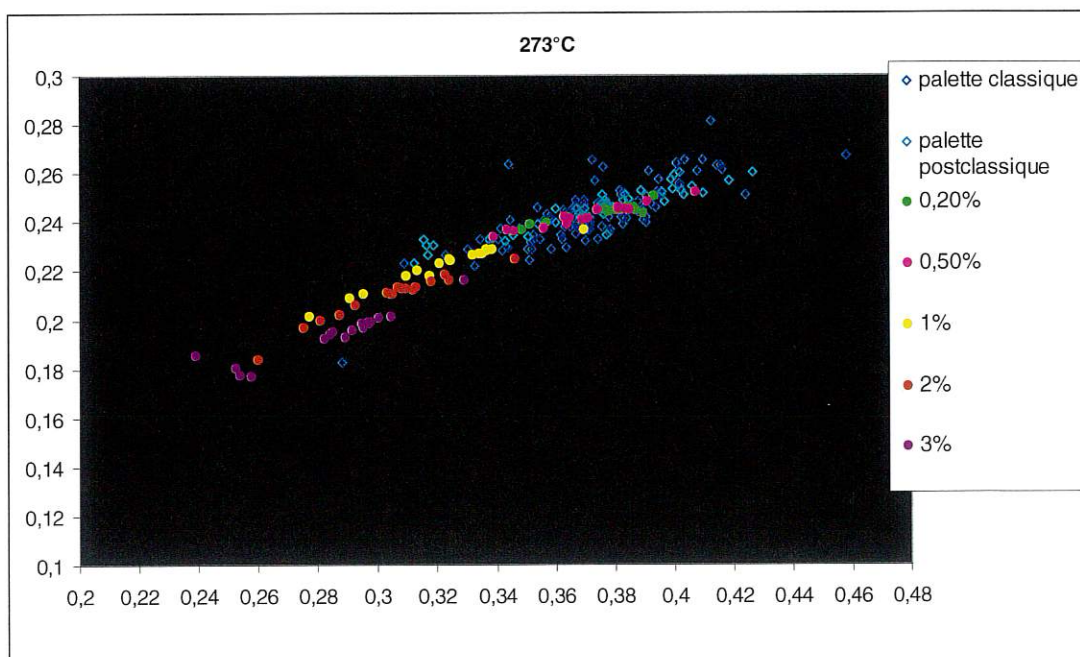


Pour la série à 181°C, la quasi totalité des pigments ayant des pourcentages en indigo de 2 et 3 % ne se trouvent pas dans la zone des bleus mayas archéologiques. Seuls ceux dont la durée de cuisson ne dépasse pas trois minutes s'y trouvent.

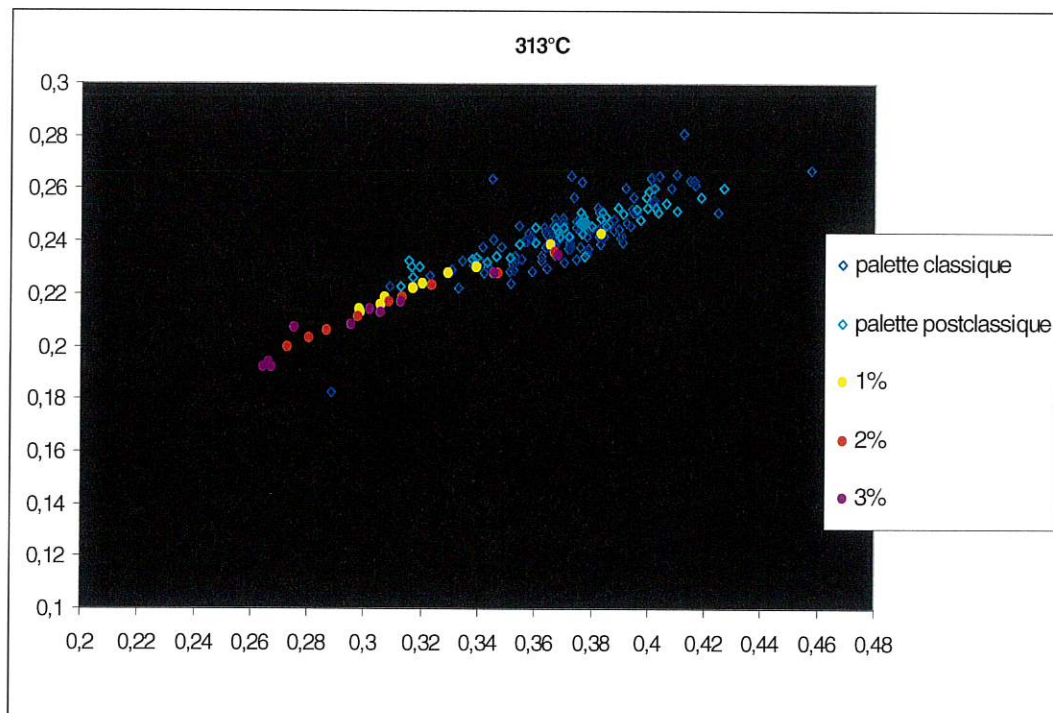




A 219°C, les pourcentages de 2 et 3% ne donnent pas des couleurs appartenant à la palette maya. Seuls les pigments dont la durée de cuisson est d'une minute se retrouvent près de la zone des bleus mayas. A cette température, certains pigments à 1% sont exclus de la zone (temps de cuisson supérieur à dix minutes).



Les tonalités des pigments à 2 et 3% d'indigo et cuits à 273°C ne correspondent pas à celles des bleus mayas archéologiques.



Seules les couleurs des pigments cuits au maximum pendant quatre vingt secondes à 313°C appartiennent à la zone des bleus mayas.

Quelles conclusions pouvons nous tirer ?

Trois points semblent importants :

- Les couleurs des pigments des séries 121°C et 181°C sont celles qui se superposent le mieux à celles de la palette bleue des mayas.
- Les couleurs des séries 219, 273 et 313°C que l'on retrouve dans la gamme colorée des bleu mayas archéologiques sont celles issues de faibles pourcentages en indigo (0,2 %; 0,5% ; 1%) et d'une durée de cuisson très courte (de deux à dix minutes). Ces couleurs sont peu nombreuses.
- Les couleurs des pigments contenant 3% d'indigo sont exclues de la palette maya à partir d'une température de cuisson supérieure à 181°C.

Suite à ces résultats, regardons ce que pourrait donner la palette du peintre maya :

SERIE 1 (121°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 2 (181°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 3 (219°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	

SERIE 4 (273°C)																	
Minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.2 %																	
0.5 %																	
1 %																	
2 %																	
3 %																	
SERIE 5 (313°C)																	
Secondes	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180							
1 %																	
2 %																	
3 %																	

Finalement ce que montre cette étude de colorimétrie, c'est que les artistes ont choisi ce qui est le plus économique (faible pour cent d'indigo et température peu élevée). Les résultats colorimétriques des sites sont cohérents avec ceux des reconstitutions chimiques et l'intérêt de la colorimétrie ici c'est d'avoir permis de retrouver des modèles de recettes et de mieux cerner les méthodes de fabrications.





---

## Conclusion



Cette étude du pigment bleu-vert de la Mésoamérique appelé « yax » par les mayas qui l'ont découvert, est envisagée d'un double point de vue : en tant que couleur utilisée par la civilisation maya , et en tant que matériau.

Tout d'abord, ce travail a mis en évidence l'attribution impropre du terme « bleu » maya. Il s'agit en réalité d'une gamme de couleurs allant du bleu au vert et non pas uniquement de la couleur bleu turquoise si souvent associée au « bleu maya ». Chaque tonalité de la gamme bleu-vert de « yax » possède un nom qui lui est propre. Il conviendrait aussi d'éviter d'utiliser le singulier pour nommer cette couleur, il existe DES bleu-vert mayas.

L'appellation « bleu maya » ne peut pas être aussi stricte qu'elle ne l'a été jusqu'à présent. Et cela s'applique aussi lorsque l'on considère « le bleu maya » en tant que matériau. « Le bleu maya » est constitué du mélange cuit d'un colorant organique, l'indigo et de plusieurs familles d'argiles blanches, et non pas de l'unique famille des palygorskites. De cette constatation découle le fait que le critère d'identification « du bleu maya » reposant sur la résistance du pigment à l'acide nitrique bouillant, n'est plus approprié lorsqu'il s'agit de « bleu maya » fabriqué avec une argile autre que les palygorskites. Finalement ce qui semble le plus important dans la fabrication du bleu maya c'est le fait qu'il y ait une cuisson.

L'étude des bleu-vert mayas envisagés sous l'angle de la couleur nous a permis de cerner ce qu'a pu être l'univers des couleurs chez les mayas en prenant en compte toutes les composantes de cet univers et notamment historiques, sociales et symboliques. Les bleu-vert mayas furent utilisés quasiment sans discontinuité du VII<sup>e</sup> siècle jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle dans tout le Mexique et jusqu'à Cuba.

Malheureusement les rares sources historiques sur la fabrication des couleurs ne datent que de l'époque coloniale et ne donnent pas explicitement de recettes. On y dénombre trois couleurs « bleues » vendues sous forme de pains dans les marchés indiens à cette époque : *matlalli*, *xiuhquilitl* et *texotli*. Cette dernière semble utiliser une argile et pourrait bien être du bleu maya. Avant la colonisation, c'étaient les artistes *ah ts'ib* souvent issus des plus hautes couches sociales qui détenaient les secrets de fabrication des couleurs qui leur étaient enseignés au sein des *calmécac* par le corps sacerdotal.

La couleur *yax* possédait une grande valeur symbolique. Associée au centre du monde, à l'arbre cosmique *ceiba* et au dieu de la pluie *Chac*, elle était utilisée lors de nombreux rituels de purification et de sacrifices, ou encore dans la représentation de ces scènes magico-religieuses sur les peintures murales mayas.



Ce caractère sacré était également inhérent aux matières premières et au procédé de fabrication des bleu-vert mayas. En effet la plante à indigo, *xiuhquilitzahuac*, était une plante considérée comme magique et l'argile, *sak' lu'um*, en plus de ses vertus thérapeutiques possédait un caractère sacré puisqu'elle venait des cenotes, lieux de culte où résidaient les divinités. La cuisson *chuh*, où les pigments étaient sacrifiés au feu, suit une conception hautement symbolique de la transformation de la matière chez les mayas « pour la rendre plus forte » et améliorer ses qualités.

C'est au sein d'un environnement limité en ressources minérales que les artistes mayas ont réussi à fabriquer les couleurs bleues et vertes qui leur faisaient défaut. Ils utilisèrent des argiles et des plantes pour enrichir leur palette chromatique de teintes bleues et vertes mais aussi de rouges et de jaunes. Il est important de souligner qu'il existe au même titre que les bleus verts mayas, des verts mayas, des rouges mayas et des jaunes mayas.

La palette maya est peut-être l'une des palettes qui contient le plus de couleurs végétales. La fabrication des pigments était un art à part entière mais le chemin des argiles pour arriver jusqu'à l'indigo est très probablement lié à l'art de la teinture. Deux hypothèses s'offrent à nous : soit les techniques de teintures traditionnelles ressemblaient à celles dites « primitives » c'est à dire qu'elles se réalisaient dans des fosses enterrées, et dans ce cas dans un sol argileux, où étaient déposées les feuilles fraîches et l'eau ; soit c'est lors d'une étape consécutive à la teinture des fibres, le foulage, qui consistait à laver les fibres ou les tissus teints avec des argiles « *tierra de batàn* » pour enlever l'excédent de colorant non fixé. Quoi qu'il en soit les Mayas auraient pu profiter de ce phénomène d'absorption de l'indigo par l'argile et surtout auraient mis au point la cuisson de cette laque pour fabriquer leur précieux pigment. La cuisson est bien l'étape essentielle à l'obtention de la couleur et c'est une réelle transformation de la matière qui a lieu.

C'est l'étude des bleu-vert mayas en tant que matériaux qui nous le confirme : lorsqu'il s'agit des palygorskites, mêmes si ce ne sont pas celles qui sont exclusivement utilisées, on peut effectivement parler d'inertie chimique des bleu-vert mayas fabriqués. C'est dans l'étape de cuisson de ces argiles que réside le secret de cette stabilité.

Les palygorskites sont constituées d'une structure dite « en briques creuses » ou canaux nanométriques dans lesquelles est logée l'eau zéolitique. La propriété intéressante ici, hormis la capacité d'absorption de l'argile, est son comportement à la chaleur. En effet, un chauffage à une température supérieure à 150°C, provoque le départ de l'eau zéolitique et laisse la place aux molécules d'indigotine qui viennent alors s'insérer dans les canaux de l'argile de manière irréversible. Une réaction chimique démontrée par simulation numérique intervient, elle a pour conséquence l'apparition de la couleur avec un changement de teinte par rapport à l'indigo de départ. Cependant un autre « composé » est présent lors de ces réactions il s'agit de

l'indirubine. En effet la proportion relative d'indirubine dans, *l'indigofera suffruticosa* Miller. plante à indigo mexicaine, est importante par rapport à l'indigotine. Mais jusqu'à présent sa participation au processus réactionnel n'a pas été envisagée, peut-être est-ce un tort ? En tout cas certaines de nos observations nous laissent à penser qu'elle ne doit pas être mise à l'écart.

Un chauffage à des températures supérieures provoque une augmentation de la taille des canaux permettant peut-être à de plus grosses molécules d'entrer ? Peut-être est ce là une voie de recherche pour d'autres colorants ?

Deux types de fabrication des bleu-vert mayas ont pu exister à l'époque préhispanique : la voie humide avec l'utilisation de décoctions de feuilles fraîches, auquel cas la fabrication était réalisée de manière consécutive à la cueillette des feuilles, et donc soumise à un calendrier et restreinte dans le temps. Soit en utilisant la voie sèche avec l'utilisation d'indigo solide, auquel cas la fabrication du pigment pouvait avoir lieu toute l'année et en plus grande quantité. Mis à part le fait que l'indigo se trouve sous deux formes distinctes, pigment ou colorant, plusieurs points différencient ces deux méthodes : par la voie humide le mélange argile-indigo est plus homogène, le résidu coloré bleu-vert et le pigment après cuisson plus lumineux et sans petits grains d'indigo non fixés ; alors que par voie sèche, le mélange est moins homogène, le résidu est bleu-gris et le pigment après cuisson présente de nombreux grains « bleus-violet » enchâssés entre des grains de bleu maya et d'argile blanche n'ayant pas réagit.

Cette caractéristique permet de distinguer les bleu-vert mayas obtenus par les deux voies. Ces premières reconstitutions du pigment nous ont permis de d'observer que quelque soit la voie choisie, la cuisson modifie la couleur qui devient plus saturée et cela au bout de quelques minutes. Même par voie humide où l'on cuit une poudre déjà bleu-vert, ce phénomène est visible : on assiste à une sorte de diffusion de la « couleur » à la surface de l'argile.

Les deux hypothèses concernant l'apparition de la couleur propre au bleu maya, sont : à cette instant l'indigotine absorbée à la surface rentre dans les canaux, remplaçant progressivement l'eau zéolitique. Là elle se lie au fer présent dans la structure de l'argile, ce qui modifie son spectre d'absorption de la lumière dans le visible. Ou bien, l'indirubine contribue au phénomène, soit en se transformant en indigotine, soit en pénétrant dans les canaux dilatés par l'élévation de température.

Au fil de nos expérimentations il est apparu que de nombreux paramètres influent sur la couleur : comme la nature de l'argile, le pourcentage d'indigo, la durée et la température de cuisson. La multitude de recettes modernes de préparation du bleu maya qui ont servi à l'analyse comparée avec des échantillons archéologiques, pour lesquelles il n'a pas été possible de définir un protocole commun et cohérent de fabrication du pigment, montre qu'il était nécessaire de réaliser un nuancier de couleur répondant à un protocole d'étude précis afin de définir l'influence de chaque paramètre sur l'obtention de la couleur. Contrairement à la plupart des

reconstitutions de pigments, qui avaient été menées jusque là avec des produits purs de laboratoire, on a décidé de travailler avec les matériaux qu'utilisaient les mayas, c'est-à-dire l'argile d'un *cenote* (Sakalum, palygorskites) et un pain d'indigo du Mexique.

L'étude colorimétrique des trois cent quatre-vingt-dix bleu-vert mayas standards nous a permis de suivre l'évolution de la saturation de la couleur en fonction des paramètres susdits.

Lorsque la température de cuisson est modérée, le renforcement de la saturation de la couleur semble être dû à un processus thermiquement activé, probablement une diffusion. A température élevée, une diminution de la saturation et un changement de teinte suit le renforcement. Ce qui pourrait s'expliquer par une désorption de l'indigo fixé à la surface de l'argile.

Finalement trois points importants apparaissent : il existe un seuil de température pour lequel la saturation maximale est atteinte et reste stable ; elle se situe vers 180°C. En fait, il s'agit surtout là d'une température supérieure à 150°C, température correspondant au départ de l'eau zéolitique dans les palygorskites. Il existe un seuil de durée de cuisson à partir duquel la saturation est maximale et stable : environ 120 secondes. C'est une donnée importante jamais relatée par aucune autre étude ; il n'est donc pas nécessaire de chauffer le mélange pendant des heures.

Il existe un seuil maximal de teneur initiale en indigo qui ne dépasse pas deux pour-cent, et au delà duquel la saturation n'augmente plus. Les cuissons effectuées à des températures élevées ne doivent pas être écartées des hypothèses de fabrication des bleu-vert par les Mayas car c'est là qu'on obtient les couleurs les plus saturées et les plus vives à conditions ne pas dépasser une minute de cuisson.

La dernière observation amenée par la réalisation de ce nuancier est qu'il est possible d'obtenir des verts si la teneur initiale en indigo est inférieure à un pour-cent et la température modérée.

La comparaison des données colorimétriques du nuancier avec les résultats de l'enquête colorimétrique que nous avons menée sur place dans neuf sites mayas nous a permis d'émettre des hypothèses concernant les recettes mises en œuvre en fonction des époques ou des régions. Ce qui est surprenant c'est que finalement les conclusions données par l'étude du nuancier sont corroborées par les résultats de l'étude de la palette chromatique maya : ce sont les pigments cuits à une température modérée et à des pourcentages ne dépassant pas les deux pour-cent qui correspondent le mieux à la palette chromatique bleu-vert des Mayas. La couleur de quelques pigments cuits à des températures élevées ou des pourcentages supérieurs à deux pour-cent pendant des temps très courts sont également compris dans la zone des bleu-vert mayas archéologiques. Leur couleur correspond plutôt au bleu-vert saturé de la période classique. Des teneurs en indigo faibles inférieures à un pour-cent et des températures modérées donnent des couleurs qui s'apparentent plus à la période postclassique.

L'enquête colorimétrique des vingt-deux peintures murales de différents sites de l'aire maya nous a permis d'étudier les mutations, les disparitions, les innovations, les fusions qui affectent tous les aspects de la couleur historiquement observables.

La mutation la plus apparente est celle du changement radical de la palette chromatique lors du passage à l'ère postclassique. Celle-ci se restreint, le nombre de couleurs bleues utilisées ne dépasse pas trois, l'utilisation de verts devient rare, tout comme les superpositions de couches colorées pour obtenir différentes nuances de bleus ou de verts. A l'époque postclassique, on assiste donc à une évolution de la palette du peintre, du style et des techniques picturales.

Au sein de l'époque classique tardif, on perçoit également des changements de la palette du peintre qui semblent coïncider avec les mouvements migratoires de la civilisation maya, principalement lorsqu'à la fin du classique tardif, elle migre des basses terres centrales (Chiapas, Campêche) vers les basses terres du nord (Yucatán). On y voit les prémices de la diminution de la palette chromatique bleu-vert et peut-être une simplification dans l'utilisation des couleurs.

Toutefois sans pouvoir parler de code de la couleur comme il y paraît à Bonampak, il semble que dans le Yucatán avec un site comme Chichen Itza, la différence de tonalité entre certains éléments iconographiques comme les plumes et le jade n'existe plus réellement. Mais ce ne sont que des suppositions qui viendront peut-être se confirmer lors de l'approfondissement de l'étude colorimétrique.

La dichotomie entre époques classique et postclassique au niveau des couleurs utilisées, est visible également pour les techniques de peinture murale et les matériaux mis en œuvre.

Au niveau des enduits, ceux de la période classique sont composés de chaux, de charges de type chaux éteinte réutilisée et de sables appelés sascab ; le tout étant mélangé à un liant de type gomme végétale. Leur aspect est plutôt grossier et hétérogène. Ils présentent parfois un travail de polissage. Des différences régionales au niveau de la nature des enduits ont été mises en évidence grâce à l'analyse MEB/EDX.

Dans les basses terres centrales, la chaux utilisée est dolomitique (échantillon la pasadita) alors que dans les basses terres du nord la chaux est calcitique. Ceux de l'époque postclassique sont plus fins et homogènes. Ils ne contiennent pas de sascab ni ne présentent de travail de polissage. Par contre la présence du liant est toujours visible. Souvent cet enduit est formé de deux couches dont l'une est colorée. Des études ont montré qu'il s'agissait dans ce cas, c'est-à-dire principalement la région de la cote orientale, d'une chaux calcitique issue de coquillages marins.

L'utilisation de liant pour la fabrication des enduits est une spécificité du monde maya. C'est une adaptation technique pour faire face au problème des hautes températures du milieu ambiant. Les gommes végétales aident à retenir l'humidité à l'intérieur de l'enduit permettant au séchage de s'effectuer lentement et de manière homogène. En ce qui concerne la chaux dolomitique l'ajout de liant améliore les

propriétés de l'enduit réalisé. Il permet un mélange homogène de la phase inerte à l'eau : l'oxyde de magnésium avec la phase « active » l'oxyde de calcium qui donne la chaux. Il semble que les Mayas préparaient à sec un mélange de chaux vive et de sascab puis versaient de l'eau gommeuse dessus. Cette pratique encore vivante dans les années soixante au Yucatán, permettait aux peintres d'exécuter des parties de leur composition sur un enduit qui restait frais plus longtemps, procurant alors aux couches picturales une certaine résistance.

La technique picturale n'était cependant pas « a fresco ». Les pigments étaient mis en suspension dans un mélange d'eau de chaux et de gommages végétales. Les finitions et certains détails étaient ensuite réalisés « a secco ».

Au niveau de la couche picturale seules les techniques d'application des couches colorées présentent la dichotomie d'ordre chronologique : époque classique – époque postclassique.

Au classique les superpositions de couches de couleurs différentes ou de mélange de pigments sont courantes. La palette chromatique est constituée de nombreux verts et bleus. Au postclassique les superpositions de couches de couleurs différentes ou les mélanges avec d'autres pigments colorés n'existent plus, le vert a disparu de la palette. La couleur bleue est prédominante et l'on ne compte que deux ou trois tonalités. Les couches colorées sont très fines.

En ce qui concerne la composition du bleu maya, les différences ne se situent pas au niveau de la chronologie mais plutôt au niveau de la localisation géographique des sites. D'après nos analyses, les recettes de fabrication des bleu-vert mayas dépendent des ressources minérales de chaque région. Dans le Chiapas le sol étant constitué de calcaire dolomitique on trouve des couleurs issues de colorant (bleu, rouge, vert) fixés sur de la dolomite.

Dans le Yucatán, les bleu-vert mayas sont à base d'argile dont le sol de cette région regorge.

Sur la Côte orientale du Quintana Roo, on trouve un sol calcitique et des bleu-vert mayas qui ne possèdent pas d'argile mais des carbonates.

Finalement cette étude a permis de définir de manière plus large ce qu'est le bleu maya ou plutôt les bleu-vert mayas. En s'intéressant au contexte dans lequel le pigment a été fabriqué et utilisé, nous avons pu aborder les multiples aspects auxquels il est attaché en tant que matière précieuse, en tant que symbole, en tant que couleur. Nous nous sommes particulièrement attaché à comprendre ce qu'il se passait lors de la cuisson, comment évoluer les différents paramètres en jeu afin d'établir un rapport entre recette et couleur. Ce qui n'avait jamais été réalisé jusque là. L'étude des spécificités d'une époque ou d'une région a permis de compléter les connaissances sur les techniques picturales. Malgré les nombreuses notions abordées, l'étude ne fait que commencer. Elle sera approfondie avec de nouvelles techniques analytiques complémentaires (thermochimie, EDX) et l'analyse de nouveaux échantillons en provenance du Mexique. De nouvelles voies de recherche (voie

humide, rôle de l'indirubine, temps de cuisson , argile de famille différente) ont été mises à jour et pourront être examinées plus précisément. Enfin cette étude pourra s'élargir aux autres couleurs semblables aux bleu-vert maya comme le vert maya ou le rouge maya afin de définir les colorants qui sont présents. Mais là il y a peut-être le risque d'être confronté comme avec les bleu-vert mayas, à l'impossibilité de séparer le complexe argile-colorant.

A ver....





YAX

---

# Bibliographie





## Ouvrages généraux : Art maya

BAUDEZ, F. et BECQUELIN, P. *Le monde précolombien : Les Mayas*. L'univers des formes, éd Paris : Gallimard, 1984.

BERNAL, I. *Formacion y desarrollo de Mesoamerica*. éd. México : Colegio de Mexico, 1977, tome 1.

*Les trésors de l'Amérique précolombienne*, LOTHROP, S. K. éd. Genève : Albert Skira, 1964. 245 p.

STEGGERDA, M. *Mayan Indians of Yucatan*. éd Washington D. C : Carnegie Institution of Washington, 1941.

STEPHENS, J.L et CATHERWOOD, F. *Aventure de voyage en pays maya*. (2 vol), Gérard Watelet, éd. Paris : Pygmalion, 1993.

*Archéologie et art précolombiens : la Mésoamérique*, TALADOIRE, E. éd. Paris : Ecole du Louvre, Réunion des musées nationaux, 1995. 351 p. (Manuel de l'Ecole du Louvre).

THOMPSON, E. *People of the Serpent Life and Adventure Among the Mayas*. éd. New-York: The Riverside Press Cambridge, 1932.

*Handbook of Middle Americans Indians*, WAUCHOPE, R. éd. Austin : University Texas Press. vol. 1, 2, 3, 4, 10, 11, 17, 18.

## Les périodiques

*American Antiquity*, publiés par la Society for american Archaeology aux Etats-Unis.

*Ancient Mesoamerica*, Cambridge, University Press.

*Le journal de la société des Américanistes de Paris*.

*Arqueologia Mexicana*, Instituto Nacional de Antropología e Historia de México.

*Estudios de cultura Maya* et *Estudios de Cultura Nahuatl* de l'Universidad Nacional Autónoma de México.

*La pintura mural prehispánica en Mexico*, Boletín informativo de l'Instituto de Investigaciones Estéticas de l'UNAM à México.

*Mayab* de la Sociedad Española de Estudios Mayas.

*Mexicon* en Allemagne.

## Ouvrages : symboles et religions

ALVAREZ AREVALO, M. *Iconografía aplicada a la escultura polychromada*. 1990, p.16

BAUDEZ, C. F. *Une histoire de la religion des mayas*. éd. Paris : Albin Michel Histoire, 2002. 472p.

DESRUISSEAU, P. *Pop Wooh : Popol Vuh, le livre du temps. Histoire sacrée des Mayas quitchés*. éd. Paris : Triptyque Le castor astral, 2002. 249 p. (en collaboration avec AMAYA Daisy).

MILLER, M. E et TAUBE, K. *God and Symbols of ancient Mexico and the Maya, an illustrated Dictionary of Mesoamerican Religion*, éd. London : Thames and Hudson, 1993.

MIRCEA, E. *Le chamanisme et les techniques archaïques de l'extase*. éd. Paris : Payot, 1992. 405 p. (collection Bibliothèques historiques).

PASTOUREAU, M. *Bleu : histoire d'une couleur*, éd. Paris : Seuil, 2000. 215 p.

RUIZ de ALACRON, H. *Treatrise on the Healthen Superstitions and Costumes that Today Live Among the Indians Natives of this New Spain*. [1629], éd. Oklahoma: Oklahoma University Press, 1984. Traduction nahuatl-anglais de Andrews, Richard et Ross Hassing.

## Ouvrages : littérature, langue maya et écriture

Anonyme. *Del modo como hacian sus pinturas los indigenas de la zona maya y otras noticias*, Manuscrit inédit 1548, MEADE, M. Paleografía e Investigación. Archives du Fondos Virreinales del Archivo del Centro de Estudios de Historia de México, Condumex.

BAUDEZ, C. F. *Jean Frédéric Waldeck, peintre. Le premier explorateur des ruines mayas*. éd. Paris : Hazan, 1993.

COE, M. *L'art maya et sa calligraphie*. éd. Paris : de la Martinière, 1997. 240 p

CORTES, H. *La conquête du Mexique*. éd. Paris : la découverte, 1982.

*Diccionario Maya Cordemex*, éd Mérida : Alfredo Barrera Vasquez, Cordemex, 1980.

DURAN, D. *Historia de las Indias*. 1588, tome 1, Madrid, Bibliothèque Nationale. p. 191.

EMMART, E. W. 1940. *The Badianus Manuscript (Codex Barberini, Latin 241) Vatican library: an Aztec Herbal of 1552*. éd. Baltimore: John Hopkins Press.

HERNANDEZ, F. *Obras completas III. Historia natural de la Nueva España* . éd. México : Universidad Nacional Autónoma de México. 1959.

LANDA, Fray Diego de. *Relacion de las cosas de Yucatán* . éd. México : Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, 1994.

SAHAGUN, Fray Bernardino de. *Historia de las cosas de la Nueva España*. éd. México : Editorial Porrúa, 1981.

TORQUEMADA, Fray Juan de. *Monarquía indiana*. livre 1, chap XI, pp 10-31 ; livre IX, chap VIII, p 181.

## Ouvrages : plantes et colorants

ARTHUR, J, ANDERSON, O. Materiales colorantes prehispánicos, *Estudios de cultura Náhuatl*, UNAM, México, 1963, vol IV, pp 73-83, 1963.

BALFOUR-PAUL, J. *Indigo* . éd Londres : British Museum Press, 1998

CARDON, D., CHATENET, G. *Guide des teintures naturelles*, éd. Genève : Delachaux et Niestlé, 1990.

CASTELLO YTURBIDE, T. Las huellas de una flor. *Arqueología mexicana*, 1996, vol.3, num. 18, p. 64-67.

EMMART, E. W. 1961. Notes on Aztec Dye Plants: Indians of Prehistoric Mexico Skilled in Use of Natural Colorings. *Plants and Gardens*, vol. 20, no. 3: 83-85.

HERNANDEZ, F . *Historia de las plantas de nueva España*. éd. México : Imprenta Universitaria, 1942-46. 3 vols.

MARTINEZ, M. *Catalogo de nombres vulgares y cientificos de plantas mexicanas*. Ed México : Fondo de Cultura Economica, 1987.

*Relaciones Geograficas de Yucatan*. éd México : Mercedes de la Garza, UNAM, 1980.

ROYS, R. *The ethnobotany of the Mayas*. éd New Orléans : Middle American Research Series, 1973.

SANCHEZ, M. R. *Historia del anil o xiuhquiltl en centro america*. éd El Salvador : Ministerio de Educacion, 1976, 2 vols ; 1. p. 32.

SARABIA VIEJO, J. *La grana y el anil : technicas tintoreas en Mexico y America central*. éd. Sevilla : Escuela de Estudio hispano- americanos de Sevilla, 1994.

TUROK, M. Xihuitl, nocheztl y tixinda. Tintes del Mexico antiguo. *Arqueologia Mexicana*. 1996, Mexico, vol III, n° 17.

WALLERT, A. 1997. The analysis of dyestuffs on historical textiles from Mexico. In *The unbroken thread: Conserving textile traditions of Oaxaca*, ed. Kathryn Klein. Los Angeles: J. Paul Getty Trust. 57–85.

## Ouvrages : techniques picturales et matériaux

*Painted architecture and polychrome monumental sculpture in Mesoamerica*. Washington D. C : Elisabeth Hill Boone, Dumbarton Oaks Research Library, 1981.

BOYTON, R. . *Chemistry and technology of lime and limestone*. éd. New York : Interscience Publishers, John Wiley and sons, 1966, p. 176-177.

CARILLO y GARIEL, A. *Tecnica de la pintura de Nueva Espana*. éd. México : Universidad Nacional Autonoma de México, 1983.

DOMINGUEZ, J-M, SCHIFFER, I. *Las arcillas, el barro noble*, Fondo de cultura económica, primera ed. 1992.

FERRAGANI, FORTI, MALLIET et TORRACA. *Techniche di conservazione degli intonaci : L'intonaco, Storia, Cultura e Tecnologia*. Atti del Congresso di studi, Rome, 1985, p. 328-333.

GETTENS, R. J, STOUT. G. L. *Painting Materials : a short encyclopaedia*. éd. New York : Dover, 1966.

GONZALEZ TIRADO, C. *El tzauhtli : mucilago de orquidea. Obtencion, usos y caracterisacion*. Tesis : Licenciatura de Conservacion Restauracion des Bienes Muebles : Escuela de Conservacion y restauracion Manuel Negrete del Castillo, México : 1996.

GRIMALDI, D-M. Painting techniques and deterioration due to air pollution of the wall paintings of the aztecs at the great temple of Tenochtitlan in Mexico city, *Thesis of Master in Art Conservation*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2000.

HANSEN, E et al. Los analisis de los estucos y pinturas arquitectonicas de Nahbé : resultados préliminaresde los estudios de los metodos y materiales de produccion. *VII Simposio de Incestigaciones arqueologicas en Guatemala*, Guatemala, Museo Nacional de Antropologia y Etnologia, 1994, p. 18-22.

LITTMANN, E.R. Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters and Stuccos : the Use of Barks Extracts in Lime Plasters. *American Antiquity*, 1960, vol 25, n°4, p. 593-596.

*La pintura mural prehispanica en Mexico :. Plumas, tocados : una vieja historia de identidad perdidas*. / DE LOURDES NAVARIJO ORNELAS, M. Mexico : éd Instituto de Investigaciones Esteticas, UNAM : II, 2001, p. 177-191.

MAGALONI, D. Optical and electronic Microscopy of prehispanic mural Paintings. *Materials Issues in Art and Archeology* , II. Pittsburg : Material Research Society, 1991. p.145-150.

MAGALONI, D. Studies on the Mayan mortar techniques.. *Materials Issues in Art and Archeology*. Pittsburg : Material Research Society, 1995, 352. p.483-489.

MAGALONI, D . *Los pintores de Bonampak*, dans : Robertson G, Merle, ed gral., *Eigth Palenque Round Table*, San Francisco, The Pre-Columbian Art Research Institute : X, 1996, p. 158-168.

*La pintura mural prehispanica en Mexico : El arte en el hacer, tecnica pictorica y color en la pinturas de Bonampak* / MAGALONI, D, Mexico : éd. Instituto de Investigaciones Esteticas, UNAM : Área maya, Bonampak, II, 2001, pp 50-80.

*La pintura mural prehispanica en Mexico : Materiales y técnicas de la pintura mural maya* / D.MAGALONI. D, México : éd. Instituto de Investigaciones Esteticas, UNAM : Área maya, Bonampak, II, 2001, p. 155-198.

MARGIVAL, F. Couleurs et Peintures au Temps des Civilisations Mexicaines Précoltésiennes. *Peintures, Pigments, Vernis*. 1955, 31, p. 1078-1086.

MARTINEZ CORTES, F. *Pegamentos, gomas y resinas en el Mexico prehispanico*. Ed. México : Résistol S.A. 1970.

MATEOS, F. *Tecnica y materiales de los relieves policromos y la pintura mural de Tonina, Chiapas*. Tesis : Licenciatura de Conservacion Restauracion des Bienes Muebles : Escuela de Conservacion y restauracion Manuel Negrete del Castillo, México : 1994.

PANCZNER, W. D. *Minerals of Mexico*. éd. New York : Van Nostrnd Reinold Company, 1987.

SANCHEZ, P. *Properties and management of soils in tropics*. éd. New York: John Wiley and Sons, 1976. 72p.

## Ouvrages : sites archéologiques

FETTWEIS-VIENOT, M. *Peintures murales postclassiques du Quintana Roo, du catalogue au déchiffrement, recherché d'une méthode et application á deux cas : Cóba et Xel-ha*. éd. Paris: Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 1981.

LOMBARDO, S. *La pintura mural maya en Quintana Roo*. éd. México : INAH, 1987.

MILLER, A. *On the edge of the sea, mural painting at Tancha – Tulum, Quintana Roo, mexico*. éd. Dumbarton Oaks Trustees for Havard University, 1982.

MILLER, M. E. *Tehe murals of Bonampak*. éd. Princeton : Priceton University Press, 1986.

MORRIS.H. E. *Temple of the warriors at Chichen Itza, Yucatan..* éd. Washington: Carnegie Institution of Washington, publi 406, 1931.

ROBERTSON, M. G. *Painting practices and their change through time of the Palenque stucco sculpture*. en Hammond Norman, éd New York: Social Progress in Maya Prehistory, Academic Press, 1977. p. 297-326.

## Articles scientifiques : bleu maya

ARNOLD, D. E, et BOHOR, B. F. Attapulgitite and Maya blue: an ancient mine comes to light. *Archaeology*, 1975, vol.28, num. 1.

CHIARI, G., GIUSTETTO, R., DRUZIK, J., SCHILLING, M., REYES VALERIO, C. Maya blue structure : some news insides. *20th Annual Meeting of Dyes in History and Archeology Proceeding*, Amsterdam, 2001.

DE YTA, A. *Estudios termicos del azul maya*. Thèse 3° c. : Sciences de la matière : Ecole Supérieure de Physique et Mathématiques, IPN, México : 1977.

FOIS, E., GAMBA, A., TILOCCA, A. On the unusual stability of Maya blue paint : molecular dynamics simulations. *Microporous and Mesoporous materials*, Elsevier Science, 2003, n°57, pp 263-272.

GETTENS, Rutherford. An Unsolved Problem in Ancient Pigments. *American Antiquity*, 1962, V, 7, num. 4. p. 557-564.

KLEBER, R., MASSCHELEIN-KLEINER, L., THISSEN, J. Etude et identification du bleu maya, *Studies in Conservation*, 1967, vol 12, p. 41-56.

LITTMANN, E. R. Maya blue : a new perspective, *American Antiquity*. 1980, vol. 45, num. 1. p. 87-100.

LITTMANN, E. R. Maya blue-further perspectives and the possible use of indigo as the colorant, *American Antiquity*. 1982, vol. 47, num. 2.

MERWIN, E., CHARLOT, J., and MORRIS, A. Chemical Analysis of Pigments : The Temple of Warriors at Chichén Itzà, Yucatan, *Carnegie Institution of Washinton* publication, Washington, D.C, 1931, Publication 406.

POLETTE, L.A, MEITZNER, G., YACAMAN, M.J, CHIANELLI, R.R. Unlocking secret of an ancien paint, *The Alchemist*, 2001.

POLETTE, L., MEITZNER, G., YACAMAN, M. J., CHIANELLI, R. Maya blue : application of XAS and HRTEM to materials science in art and archaeology. *Microchemical Journal*, 2002, num. 71, , pp 167-174.

REINEN, D. Die Natur der Farbzentren im Maya-blau. *Chemie in unsere Zeit*, 1996, n°6, p. 312-313.

REYES VALERIO, C. *De Bonampak al Templo Mayor : el azul maya en Mesoamérica*. éd. Mexico : Siglo XXI, 1993. 158 p.



SHEPPARD, O. et GOTLIEB, H. B. Maya blue : alternative hypothesis. *Notes from a ceramic laboratory. Carnegie Institution of Washinton*, 1962, 1.

TORRES, L. Maya blue : how the mayans could have made the pigment . *Materials Issues in Art and archeology. Materials Research Society Symposium Proceedings, Pittsburg*, 1988, 123, p. 123-128.

TOURBE. C. Le secret du bleu maya. *Sciences et Avenir*, 1996. p. 90.

VAN OLPHEN.H. Maya blue : a clay organic pigment. *Science*, 1966, 154, p. 545-546.

VIEILLES CAZES. C, OVARLEZ. S. Redécouverte du bleu maya. *Conservation-Restauration des biens culturels*, 2000, n°15, p. 21-27.

WITTNALL, D. DANIELS, V. COOKSEY, C. The synthesis and analysis of maya blue. *20th Annual Meeting of Dyes in History and Archeology Proceeding*, Amsterdam, 2001.

YACAMAN, M. J. et al. Hight Resolution Electron Microscopy of maya blue paint. *Materials Issues in Art and Archaeology IV, Materials Research Society Symposium Proceedings, Cancun, Mexique*, 1994, vol. 352.

YACAMAN, M. J. et al. Maya blue paint : an ancient nonostructured material. *Americam Association for the Advancement of Science*, 1996, 273. p. 223-225.

## Ouvrages scientifiques : argiles et indigo

BLANCO, C., GONZALEZ, F., PESQUERA, C., BENITO, I., MENDIOROZ, S., and PARAJES, J.A. Differences between one aluminic palygorskite and another magnesian by infrared spectroscopy. *Spectroscopy Letters*, v. 22, no. 6, 1989. p. 659-673.

CAILLIERE, S., and HENIN, S., *Sepiolite : The X-ray identification and crystal structures of clay minerals*, éd. London : Brown, G Mineralogical Society, 1961, Chapter 8. p. 325-342.

CAILLIERE, S., and HENIN, S., *Palygorskite : The X-ray identification and crystal structures of clay minerals*, éd. London : Brown, G Mineralogical Society, 1961, Chapter 9. p. 343-353.

CASES, J. M., GRILLET, Y., FRANCOIS, M., MICHOT, L., VILLIERAS, F., and YVON, J., 1991, Evolution of the porous structure and surface area of palygorskite under vacuum thermal treatment:. *Clays and Clay Minerals*. 1991,v. 39, no. 2, p. 191-201.

GRIM, R.E, 1962, *Applied clay mineralogy*: International Series in the Earth Sciences, éd. New York : McGraw Hill, 1962, 422 p.

MARTINET, J. Matières colorantes : l'indigo et ses dérivés. éd. Paris : Baillièrre et fils, 1926. 700 p. (Encyclopédie de Chimie Industrielle)

MENDELOVICI, Infrared study of attapulgite and HCl treated attapulgite. *Clays and Clay Minerals*, 1973, v. 21, no. 2, p. 115-119.

SCHWEPPE, H. Indigo and woad. In *Artists' pigments: A handbook of their history and characteristics*, vol. 3, éd. .E. W.Fitzhugh. Washington, D.C.: National Gallery of Art, 1997. p. 81-107.

SEVIGNAC.F . *Essais préliminaires de caractérisation de quatre pigments bleu indigo et de leurs précurseurs*, Rapport de stage, Licence de Phytoprotection de l'Université d'Avignon, 1995.

THOMAS, H. *Indigo*. éd. Oxford : Amber Lane Press, 1998.

## Ouvrages : colorimétrie et techniques analytiques

BELLAMY, L. J. *The infrared spectra of complexe molecule*. 1966.

BILLMEYER, F ; W et SALTZMAN, M. *Principles of color Technology*. Ed. J. Wiley and sons, 1981. 240 p.

CIE 15.2. *Colorimetry*, 2<sup>e</sup> edition. Plublication CIE 15.2. 1986.

CRETTEZ, J-P., HARDEBERG, J-Y. Analyse colorimétrique des peintures : étude comparative de trois tableaux de J-B Corot. *Techné* , 1999, 9-10, éd. Paris : LRMF, RMN.

CRETTEZ, J-P. Analyse colorimétrique des peintures : représentation des couleurs dans l'espace CIELAB 1976. *Infovisu*, 1998, Club Visu, SID France, p.12-15.

DELAMARE, F. *Vision et mesure de la couleur*, in *Datation-Characterisation en peinture pariétale et murale*, éd par F. Delamare, T. Hackens et B. Helly, PACT 17, 1987, Louvain, p. 195-222.

DELAMARE, F., CADET, E. Apport de la colorimétrie à l'étude des peintures murales médiévales de Bourgogne. La couleur des ocres jaunes et rouges, *Revue d'Archéométrie*, 1998, 22, p.111-124.

GUINEAU, B., DULIN, L. L'apport des mesures colorimétriques aux études historiques et archéologiques, *Cahier du Léopard d'or*, 1994, 4, Paris, p.115-137.

KOWALISKI, P. *Vision et mesure de la couleur*, éd. Paris : Masson, 1990, 2<sup>éd.</sup> Actualisée par F. Viénot et R. Séve.

MILLS, J. S. WHITE, R. *The organic chemistry of Museum Objects*. éd. London : Butterworths, 1994.

ROUESSAC, F. *Analyse chimique, méthodes et techniques instrumentales modernes*. 1992, p.179.

ICOM 10<sup>th</sup> triennial Meeting, Washington D. C. USA, 22-27 august 1993. Color measurement of the wall Paintings in the tomb of Nefertari. SCHILLING, M. R. ICOM, 1994, vol 1, p. 42-49.

SEVE, R.. *Physique de la couleur*, éd. Paris : Masson, 1996. 334p.



« YAX »

## Fabrications et utilisations des bleu-vert mayas.

Cette étude concerne le bleu maya d'un double point de vue, en tant que matériau et en tant que couleur utilisée par une civilisation très particulière, la civilisation maya.

En tant que matériau, nous avons comparé la synthèse du bleu maya par voie humide et par voie sèche. Par la voie sèche, nous avons affiné l'étude en mettant en évidence l'influence des différents facteurs gouvernant l'association d'une argile attapulgite mexicaine avec de l'indigo mexicain, sur la couleur du pigment obtenu. Faisant varier la teneur en indigo, la durée et la température de la cuisson, nous avons obtenu trois cent quatre-vingt-dix bleu-vert mayas constituant ainsi un véritable nuancier de standards. L'utilisation de la colorimétrie nous a permis de suivre l'évolution de la saturation de la couleur en fonction des paramètres susdits. Lorsque la température de cuisson est modérée, le renforcement de la saturation de la couleur semble être dû à un processus thermiquement activé, probablement une diffusion. A température plus élevée, une diminution de la saturation suit le renforcement. Ce qui pourrait s'expliquer par une désorption de l'indigo fixé à la surface de l'argile.

En tant que couleur utilisée par les Mayas, nous faisons le point sur ce que l'on sait de sa fabrication et de son emploi traditionnel et symbolique. Les sources historiques utilisées comprennent un manuscrit remarquable encore inédit. Ces données sont confrontées aux résultats obtenus sur des échantillons archéologiques de peintures murales, datés et de provenance sûre, appartenant à une collection privée, observés au MEB et analysés par EDX et FTIR. Tout porte à croire que les couches peintes bleues sont des bleus mayas, et qu'il existe de la même manière des verts mayas, des jaunes et des rouges mayas, tous aussi difficiles à analyser. La nature des enduits et leur mélange avec une gomme végétale est discutée. Enfin, nous présentons les résultats de l'enquête colorimétrique que nous avons menée sur place dans neuf sites mayas. Nous y mettons en évidence les caractéristiques des palettes des périodes classique et postclassique, ainsi que les codes d'usage réglant l'emploi des bleus mayas.

**Mots clés :** peinture maya, colorimétrie, bleu maya, attapulgite, indigo, nuancier.