



Intégration de données de végétation pour l'analyse spatiale d'un site archéologique : la quantification des coûts en ressources naturelles des abris pour les anciens Mayas

Nicolas Morian

► To cite this version:

Nicolas Morian. Intégration de données de végétation pour l'analyse spatiale d'un site archéologique : la quantification des coûts en ressources naturelles des abris pour les anciens Mayas. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04412328

HAL Id: dumas-04412328

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04412328>

Submitted on 23 Jan 2024

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

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



CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe

par

Nicolas MORIAN

Intégration de données de végétation pour l'analyse spatiale d'un site
archéologique : la quantification des coûts en ressources naturelles des abris
pour les anciens Mayas.

Soutenu le 31 août 2023

JURY

Madame Joëlle NICOLAS-DUROY
Madame Anabel FORD
Monsieur Jean-Michel FOLLIN

Présidente du jury
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

À Madame le docteur Anabel Ford, directrice du programme BRASS/El Pilar, ma maître de stage, pour m'avoir transmis sa passion pour l'archéologie, ainsi que pour sa pédagogie et son mentorat.

À Madame Joëlle Nicolas Duroy, ma seconde encadrante au sein de ce projet, qui a participé à la rédaction de l'intitulé de mon sujet de mémoire.

À Monsieur Jean-Michel Follin, mon enseignant référent, pour sa disponibilité et ses conseils avisés portant sur la rédaction et le contenu de mon mémoire.

À l'ensemble de l'équipe impliquée dans ce projet novateur, que ce soient les « Maya Forest Gardeners », tel que Narciso Torres, ou les membres de l'équipe archéologique, comme Justin Tran et Sherman Horn III, pour leurs enseignements et leur implication indirecte dans la rédaction de ce mémoire.

À Mademoiselle Enora Tanguy, ma camarade de promotion, avec laquelle j'ai partagé ce stage, pour son soutien moral, ses précieux conseils et ses suggestions.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de la rédaction de ce mémoire. Leurs apports financiers, émotionnels et moraux ont été des piliers essentiels de ma réussite académique.

À mon frère et à ma sœur, pour leur amour et leur admiration.



Liste des abréviations

ALS : Airborne Laser Scanning

BRASS : Belize River Archaeological Settlement

ESGT : École Supérieure des Géomètres et Topographes

ESRI : Environmental Systems Research Institute

LiDAR : Light Detection And Ranging

MARC : MesoAmerican Research Center

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PRU : Primary Residential Unit

SIG : Système d'Information Géographique

SIM : Solar Insolation Modeling

SMRF : Simple MoRphological Filter

SRS : Solitary Range Structure

SRU : Secondary Residential Unit

SVF : Sky View Factor

UML : Unified Modeling Language

UTM : Universal Transverse Mercator

Glossaire

Aguada : réserve d'eau artificielle construite par les anciens Mayas pour collecter et stocker l'eau de pluie.

Berme / « *Berm* » : plateforme surélevée qui borde les côtés des anciennes routes mayas, utilisée pour l'agriculture, en créant des zones de drainage pour permettre une irrigation plus efficace des champs.

Carrière / « *Quarry* » : site d'extraction de pierres.

Chultun : citerne / caverne souterraine creusée dans la roche pour stocker de l'eau et des provisions (aliments tels que les grains, les légumes, et autres fournitures).

Monticule / « *Mound* » : élévation artificielle / amas de terre souvent associé à des structures ou des activités humaines. Il est généralement formé par l'accumulation de matériaux tels que de la terre, des pierres, des feuilles, du bois, des débris de construction ou d'autres substances disponibles localement.

Monticule de coquillages / « *Chich Mound* » : accumulation de coquillages ou de coquilles d'animaux marins, créée par des activités humaines.

Monticule de silex / « *Chert Mound* » : accumulation de débris de silex ou d'éclats de pierre.

Place / « *Plaza* » : vaste zone ouverte et généralement plane, à vocation de lieux d'habitation, de rassemblement et d'activités publiques anciens.

Terrasse / « *Terrace* » : plate-forme artificielle / niveau surélevé construit par les anciens Mayas, utilisée pour aménager des zones planes dans des zones vallonnées ou accidentées.

Tranchée de pilleurs / « *Looters' Trench* » : pratique illégale et préjudiciable qui consiste à fouiller de manière non professionnelle et souvent destructrice des sites archéologiques dans le but de récupérer des objets de valeur historique ou artistique pour les vendre sur le marché illicite des antiquités.

Table des matières

I	LES ENJEUX AU SEIN DE LA RESERVE ARCHEOLOGIQUE D'EL PILAR	9
I.1	EL PILAR, TRESOR DE LA CULTURE MAYA : LOCALISATION ET PARTICULARITE	9
I.2	LE LiDAR : UNE TECHNOLOGIE D'ACQUISITION DE DONNEES NOVATRICE	10
I.2.1	Principes et mécanismes d'acquisition.....	10
I.2.2	Découvrir le passé caché : Le LiDAR au service de l'archéologie	11
I.2.3	LiDAR et recensement de la végétation près des monticules mayas	11
I.2.4	Détection des monticules : Pertinence décisive des données LiDAR ?.....	11
I.3	AU COEUR DES DONNEES LiDAR : INTERPRETATIONS ET VISUALISATIONS.....	12
I.3.1	Le « bonemapping » : une méthode LiDAR pour l'archéologie sous la canopée	12
I.3.2	Dévoiler les détails significatifs du relief permettant de détecter les monticules.....	14
I.4	REFERENCES ET PROLONGEMENTS : LES INFLUENCES DES TRAVAUX PRECEDENTS	15
I.4.1	Travaux de Gabriel MORDANT.....	15
I.4.2	Travaux de Juliette LARDILLEUX	16
I.5	ENJEUX ET PERSPECTIVES : LES DEFIS DE LA MODELISATION DE LA VEGETATION	17
I.5.1	L'art ancestral de la domestication végétale chez les anciens Mayas	17
I.5.2	Concaténation des données des différentes années	18
I.5.2.1	Découvertes de nouvelles espèces : Entre opportunités et défis.....	18
I.5.2.2	Le problème engendré par les multiples dénominations	18
I.5.3	En quête de fiabilité : la faille du processus d'acquisition	18
II	INTEGRATION DES DONNEES DE VEGETATION DANS LA GEODATABASE D'EL PILAR POUR UNE ANALYSE SPATIALE AVANCEE.....	19
II.1	ACQUISITION.....	19
II.1.1	Utilisation de la « Bone Map » pour l'investigation	20
II.1.2	Transfert des données de la géodatabase vers les GPS	21
II.1.3	Précision et application du GPS sur le terrain.....	21
II.1.4	Recensement du patrimoine végétal et rôle des « Maya Forest Gardeners »	22
II.1.5	Optimisation de l'acquisition de données dans les zones à faibles volumes de données	23
II.2	INTEGRATION	26
II.2.1	Établissement de méthodes de géoréférencement préalables adéquates	26
II.2.2	Structuration des données liées à la végétation dans un tableur.....	27
II.2.3	Géoréférencement et intégration du tableur de végétation dans le SIG	27
II.2.4	Simulation dans un SIG pour une meilleure gestion du cycle Milpa	28
II.3	APPLICATION ET INTEGRATION.....	29
II.3.1	Couverture spatiale de la végétation	29
II.3.2	Composition et distribution de la canopée forestière d'El Pilar	31
II.3.3	Cartographie précise de la distribution des arbres de copal	31

III APPLICATION : QUANTIFICATION DES COUTS EN RESSOURCES NATURELLES DES ABRIS POUR LES ANCIENS MAYAS.....	32
III.1 CONCEPTION D'UN MODELE D'HABITAT REDUIT ET SIMPLIFIE.....	32
III.1.1 Analyse de la répartition des espèces végétales éligibles : Les trois catégories en perspective	32
III.1.2 Composants structurels des abris mayas : Une approche quantitative	33
III.2 PARAMETRES PRIS EN COMPTE DANS LE CALCUL : TRIADE DIMENSIONNELLE	34
III.2.1 Distinction entre PRU, SRU et SRS.....	34
III.2.1.1 Unité résidentielle principale (ou « <i>Primary Residential Unit</i> » - PRU).....	34
III.2.1.2 Unité résidentielle secondaire (ou « <i>Secondary Residential Unit</i> » - SRU)	34
III.2.1.3 Structure de portée solitaire (ou « <i>Solitary Range Structure</i> » - SRS)	34
III.2.2 Processus de classification des monticules individuels.....	35
III.2.3 Longueur diagonale des monticules : Facteur clé pour quantifier les matériaux sur une base annuelle.....	38
III.3 RESULTATS DE LA QUANTIFICATION ET ANALYSE DE L'HYPOTHESE FORMULEE	40
III.3.1 Nombre d'éléments structurants requis pour la construction des abris des anciens Mayas	40
III.3.2 Nombre d'éléments structurants requis selon le type de croissance forestière des arbres / Quantification par unité de surface	40
III.3.3 Validation ou rejet : Verdict numérique.....	41
III.3.4 Paramètres majeurs influents et/ou omis dans les calculs et impacts potentiels	42
Conclusion.....	44
Bibliographie	45
Table des annexes.....	49
Annexe 1 Caractéristiques techniques de l'acquisition LiDAR à El Pilar	50
Annexe 2 Présentation de la géodatabase d'El Pilar	51
Annexe 3 Diagramme UML de la géodatabase d'El Pilar	55
Annexe 4 Le cycle Milpa	56
Annexe 5 Formulaire de recensement de la végétation.....	57
Annexe 6 Extrait du tableur recensant les données de végétation.....	58
Annexe 7 Modélisation du cycle Milpa par le biais d'ArcGIS Pro.....	59
Annexe 8 Cartes de répartition des arbres de copal au sein d'El Pilar	60
Annexe 9 Optimisation de la construction : Conception simplifiée de l'habitat des anciens Mayas	61
Annexe 10 Détail du calcul estimant le nombre de feuilles de <i>Sabal Mauritiiformis</i> par hectare au sein d'El Pilar.....	64
Annexe 11 Corrélation entre la longueur de la diagonale et la surface des monticules.....	65

Annexe 12 Extrait du tableur comprenant les champs utilisés pour la classification des monticules.....	66
Annexe 13 Histogrammes de la distribution de la longueur de la diagonale des monticules	67
Annexe 14 Tableaux de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules (avant et après fusion des deux premières catégories).....	68
Annexe 15 Détail du processus de quantification des coûts de construction de logement en termes de matériaux.....	69
Annexe 16 Extrapolation des données issues de la quantification des matériaux disponibles en fonction de leur vocation dans le processus de construction	76
Liste des figures.....	77
Liste des tableaux	78

Introduction

Le Guatemala et le Belize, deux pays relativement méconnus et situés en Amérique centrale, abritaient une ancienne civilisation qui a laissé, entre autres, des vestiges archéologiques et agricoles remarquables. Les populations Mayas ont résidé et travaillé au cœur de la forêt maya pendant plus de cinq millénaires, et leur héritage est profondément lié à ce paysage. Au sein de la péninsule du Yucatan, la côte caribéenne du Mexique et du Belize ainsi que la vaste région de Petén au Guatemala constituent la forêt continue Maya. C'est la plus septentrionale des forêts tropicales du Nouveau Monde.

Pendant la période post-classique (900-1519 après J.-C.), la civilisation Maya y a soutenu une société agraire florissante basée sur des siècles de développement durable local et de gestion des ressources.

Néanmoins, les preuves paléo-environnementales et archéologiques ont traditionnellement été utilisées pour suggérer que la fin de la période post-classique a été marquée par un échec social et politique causé par une dévastation environnementale (Brenner et al, 2002). Récemment, une étude a présenté un argument convaincant en démontrant que les sols des anciennes cités mayas sont fortement pollués par du mercure. Des récipients remplis de ce métal pauvre ainsi que des objets peints avec de la cinabre ont été découverts dans de nombreux sites mayas. Les chercheurs en ont conclu que ces derniers étaient des utilisateurs fréquents de mercure et de produits contenant du mercure, ce qui a engendré une pollution grave et dangereuse pour l'environnement et l'être humain, persistant encore aujourd'hui (Cook et al, 2022).

En réponse aux allégations de dévastation environnementale, la publication des travaux du docteur Anabel Ford a permis de les réfuter. En effet, selon elle, malgré les accusations portées à l'encontre des anciens Mayas concernant la destruction de leurs propres forêts, la forêt Maya d'aujourd'hui regorge en réalité de précieuses ressources économiques. Elle soutient que bien souvent, les gens ont tendance à idéaliser la forêt comme étant préservée de toute intervention humaine, mais en réalité, la forêt Maya peut être perçue comme le jardin des anciens Mayas.

Au cours de quatre millénaires, ils auraient développé des pratiques agricoles avancées visant à créer des jardins forestiers durables qui répondent, entre autres, à leurs besoins en matériaux de construction, tout en contribuant à l'enrichissement de la forêt.

Parmi toutes les espèces végétales présentes et reconnues par les « Maya Forest Gardeners », 22% seraient utilisées dans des processus de construction (Ford, 2008). Il est incontestable que le logement constitue l'un des besoins les plus fondamentaux de l'humanité. C'est pourquoi cette recherche se concentre sur la quantification des exigences de construction des maisons traditionnelles mayas.

La problématique est la suivante : peut-on d'abord estimer les coûts de construction de logements en termes de matériaux, puis déterminer si les ressources naturelles, comme les arbres pérennes, sont en quantité suffisante pour répondre aux besoins en abris ?

Les archéologues ont de plus en plus recours à un outil informatique appelé « Système d'Information Géographique » (SIG) pour répondre à leurs questions et tester leurs hypothèses. Depuis les années 1980, l'utilisation des SIG en archéologie a gagné en popularité, tant en Amérique du Nord (Taylor & Francis, 1990) qu'en Europe (Lock et Stancic, 1995). L'avènement de SIG généralistes, tels que ArcView et ArcGIS, dans les années 1990 a renforcé cette tendance. Aujourd'hui, l'utilisation des SIG est largement répandue et constitue une partie essentielle des méthodes de recherche archéologique.

Il en va de même pour la technologie LiDAR (Light Detection And Ranging), qui n'est pas couramment utilisée en Amérique centrale pour la planification environnementale et les projets de construction au même degré qu'aux États-Unis et en Europe, où la technologie a une histoire plus longue d'utilisation à des fins de gestion des terres non-archéologiques. Grâce à sa capacité à pénétrer la canopée tropicale et subtropicale pour révéler de vastes zones de peuplement, le LiDAR a révolutionné la compréhension du paysage ancien des Mayas et de leur utilisation de l'espace (Chase et al. 2012).

La discussion sera entamée en explorant les particularités de la réserve archéologique d'El Pilar. Ensuite, le choix des technologies utilisées sera justifié, ce qui mettra en évidence les limites des travaux existants et les problématiques auxquelles il faudra faire face.

Dans la séquence suivante, une attention particulière sera portée aux données relatives à la végétation, en abordant trois aspects clés : leur acquisition, leur intégration et leur application/interprétation dans un système d'information géographique.

Enfin, les données intégrées seront mobilisées dans des analyses afin de répondre à un scénario précis impliquant la quantification des coûts des ressources naturelles utilisées dans les abris des anciens Mayas.

I Les enjeux au sein de la réserve archéologique d'El Pilar

I.1 El Pilar, trésor de la culture maya : localisation et particularité

La réserve d'El Pilar, située dans la région de Cayo, au Belize en Amérique centrale, s'étend sur environ 2023 hectares (soit 20 kilomètres carrés) et a été établie en 1993 pour préserver le site archéologique et son environnement naturel.

À 12 kilomètres au nord-ouest de la ville de San Ignacio, le site est partagé en deux parties par la frontière avec le Guatemala, comme le montre la figure 1. Ce lieu abrite une riche forêt tropicale humide ainsi qu'une faune et flore diversifiées.

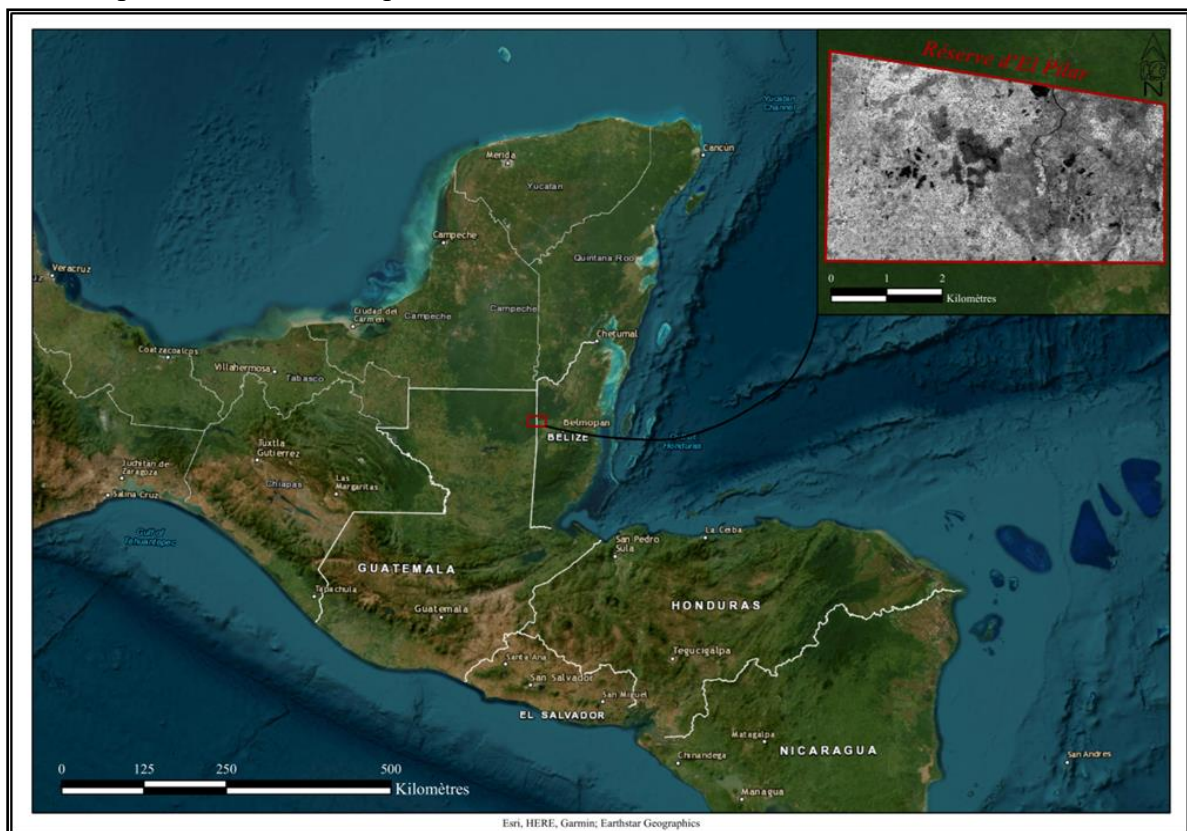


Figure 1 – Carte de situation de la réserve archéologique d'El Pilar

Source : ESRI (Environmental Systems Research Institute), HERE, Garmin, Earthstar Geographics

El Pilar se différencie des autres sites archéologiques mayas en raison de son engagement ferme à préserver les sites architecturaux dans leur état naturel. Contrairement aux pratiques courantes en Amérique centrale, comme celles observées au célèbre site archéologique mondial de Tikal, cette cité adopte une approche différente en préservant la majorité de ses structures sous la canopée, en conservant la végétation et en la considérant comme une méthode pour protéger le site contre l'érosion, la dégradation et le noircissement des pierres.

I.2 Le LiDAR : Une technologie d'acquisition de données novatrice

I.2.1 Principes et mécanismes d'acquisition

Comme l'illustre la figure 2, le LiDAR est une technologie de télédétection utilisant des faisceaux lasers pour mesurer la distance entre un émetteur et un objet. Les impulsions laser sont réfléchies par l'objet et renvoyées vers le récepteur, permettant de créer des nuages de points tridimensionnels représentant la topographie et la géométrie des objets sur le terrain.

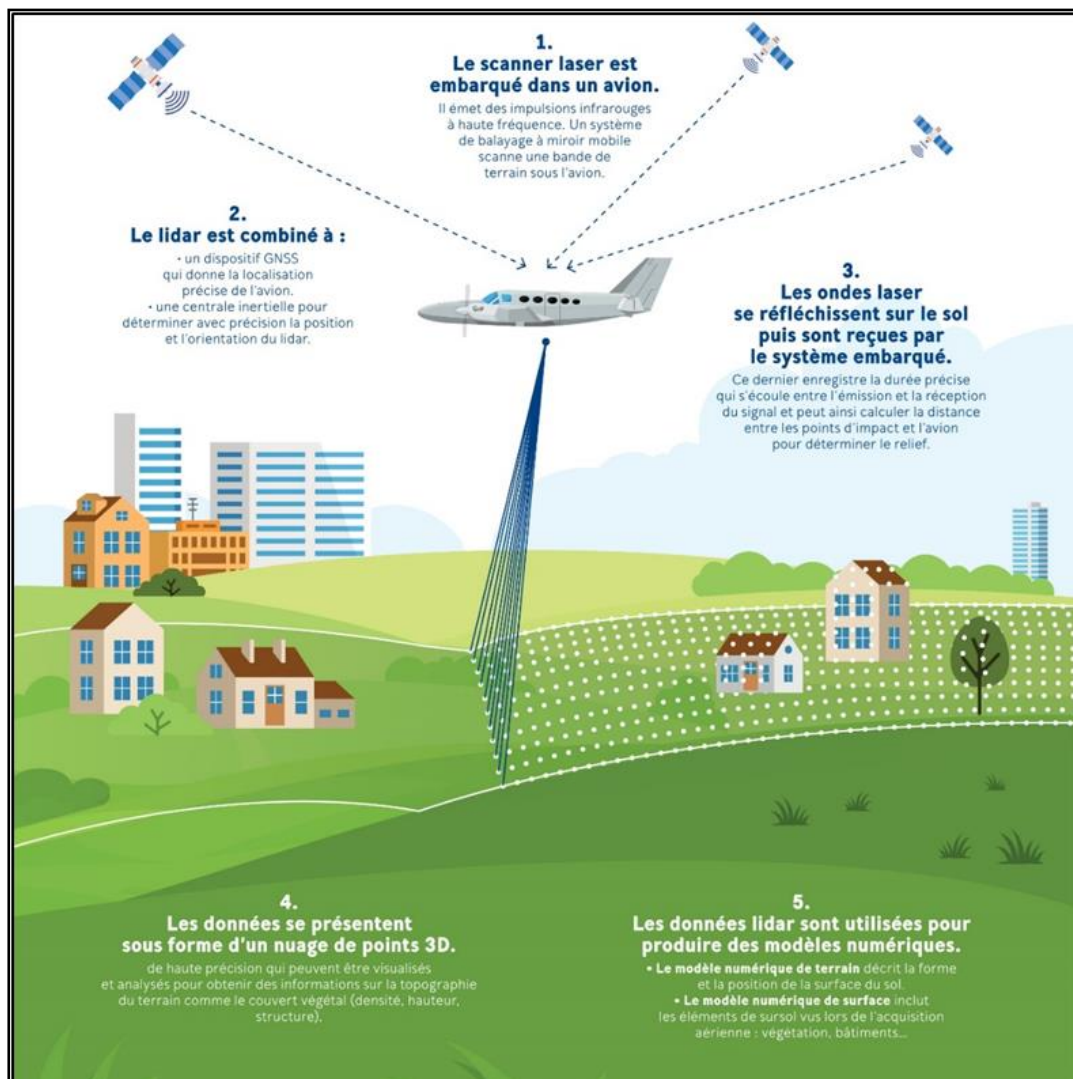


Figure 2 – Fonctionnement du LiDAR aéroporté

Source : IGN (Institut national de l'information géographique et forestière)

En 2012, la collecte de données sur le site d'El Pilar a été réalisée par une société privée nommée Airborne Imaging à l'aide d'un hélicoptère (caractéristiques de la mission en Annexe 1).

I.2.2 Découvrir le passé caché : Le LiDAR au service de l'archéologie

En archéologie, les données LiDAR sont utilisées pour cartographier des sites archéologiques et pour détecter des caractéristiques du paysage qui pourraient ne pas être visibles à l'œil nu, comme des fondations de bâtiments, des routes ou des voies de communication.

Une attention toute particulière est portée sur les monticules (ou « *mounds* ») dans le cadre de ce projet de recherche. L'objectif est de détecter ces anciennes structures enfouies en utilisant les données LiDAR à disposition. Les monticules se présentent sous la forme d'amas de terre renfermant des blocs de roches calcaires. Ils représentent l'élément le plus fréquemment observé sur le site d'El Pilar, constituant un peu plus de 50% des caractéristiques archéologiques identifiées. Toutefois, il convient de noter que leurs dimensions varient considérablement, aussi bien en termes de hauteur (de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres) que de largeur et de longueur (allant de 2×3 mètres à parfois 12×4 mètres).

Contrairement aux projets de recherches des années antérieures, les autres types de caractéristiques archéologiques (définis par le biais du glossaire) n'impactent pas la quantité et la qualité des données que l'on cherche à traiter et à incorporer. Ainsi, ils n'exercent aucune influence sur le résultat final.

I.2.3 LiDAR et recensement de la végétation près des monticules mayas

Les produits issus du LiDAR jouent un rôle essentiel dans la collecte des données de végétation car ils servent de base à la planification des études sur le terrain.

Ces dernières visent à recenser les données de végétation, mais ce recensement n'est effectué qu'après confirmation de la présence de monticules par une vérification in-situ. Cette confirmation présume que les anciens Mayas utilisaient les matériaux et ressources disponibles près de leurs futurs habitats, qui sont aujourd'hui réduits à l'état de monticules.

I.2.4 Détection des monticules : Pertinence décisive des données LiDAR ?

Au sein de la région des anciens Mayas, le LiDAR a remplacé toute autre technologie de télédétection en tant qu'outil le plus sollicité pour la recherche sur les anciens lieux d'occupation. Grâce à sa capacité à pénétrer la canopée tropicale et subtropicale pour révéler de vastes zones d'établissements, le LiDAR a révolutionné la compréhension du paysage maya ancien et de l'utilisation de l'espace (Chase, 2017).

Cependant, il est légitime de se questionner si, dans cette situation singulière, les données provenant de cette technologie jouent réellement un rôle déterminant dans la détection des monticules. Sur les 910 points de prédiction, provenant de la couche « GoTo_Concordance » de la géodatabase d'El Pilar, 532 sont acceptés, et donc réellement des éléments architecturaux propres au site d'El Pilar.¹ Le système de prédiction, basé sur une analyse visuelle des données LiDAR à disposition, démontre une fiabilité d'environ 58%. (Enora Tanguy, 2023).

Les éléments rejetés, identifiés dans l'imagerie LiDAR, sont composés d'éléments naturels (chutes d'arbres, débris de palmiers, fourmilières ou terre affaissée) et les erreurs générées par ce processus de visualisation (Ford et al., 2019). À contrario, les entités identifiées sur le terrain, et non détectées a priori sur les visualisations, donnent un aperçu des défis inhérents à l'interprétation des visualisations LiDAR.

I.3 Au coeur des données LiDAR : Interprétations et visualisations

Les données résultantes de cette technologie sont particulièrement riches et peuvent prendre en charge une variété de visualisations et d'interprétations.

I.3.1 Le « bonemapping » : une méthode LiDAR pour l'archéologie sous la canopée

Depuis une décennie, les archéologues exploitent la technologie LiDAR, dont l'Airborne Laser Scanning (ALS), pour révéler les traces d'activité humaine dans le paysage. L'ALS, variante du LiDAR, utilise des lasers continus depuis avions ou drones pour cartographier en 3D. Comparé au LiDAR classique à lasers pulsés, l'ALS offre une acquisition rapide et continue de données topographiques. Une nouvelle technique appelée « bonemapping » consiste à traiter les données ALS afin de créer une représentation cartographique du paysage, ce qui facilite la détection et l'interprétation des traces d'implantation humaine. (Clarke et al., 2015).

La « Bone Map » est un produit issu du procédé mis au point en 2013 par Thomas J. Pingel. Selon ce dernier, elle est le produit de l'application d'un filtre de pente cognitif à un modèle numérique de terrain (MNT) ou à un modèle numérique de surface (MNS) qui a déjà été soumis à un algorithme SMRF (Simple MoRphological Filter).

¹ Annexe 2 et 3

Cet algorithme utilise une approche morphologique pour lisser le MNT (ou MNS) en supprimant les valeurs extrêmes et en réduisant le bruit tout en préservant les principales caractéristiques topographiques (Pingel, 2013).

L'image obtenue est une représentation visuelle basée sur l'inclinaison des pentes, où les pixels sont plus sombres pour les surfaces fortement inclinées et plus lumineux pour les surfaces moins inclinées. C'est par le biais de ce procédé que sont interprétées les visualisations LiDAR du site d'El Pilar. Les monticules potentiels à examiner sur le terrain sont donc basés sur une prévisualisation/interprétation de la « Bone Map », illustrée par le biais de la figure 3.

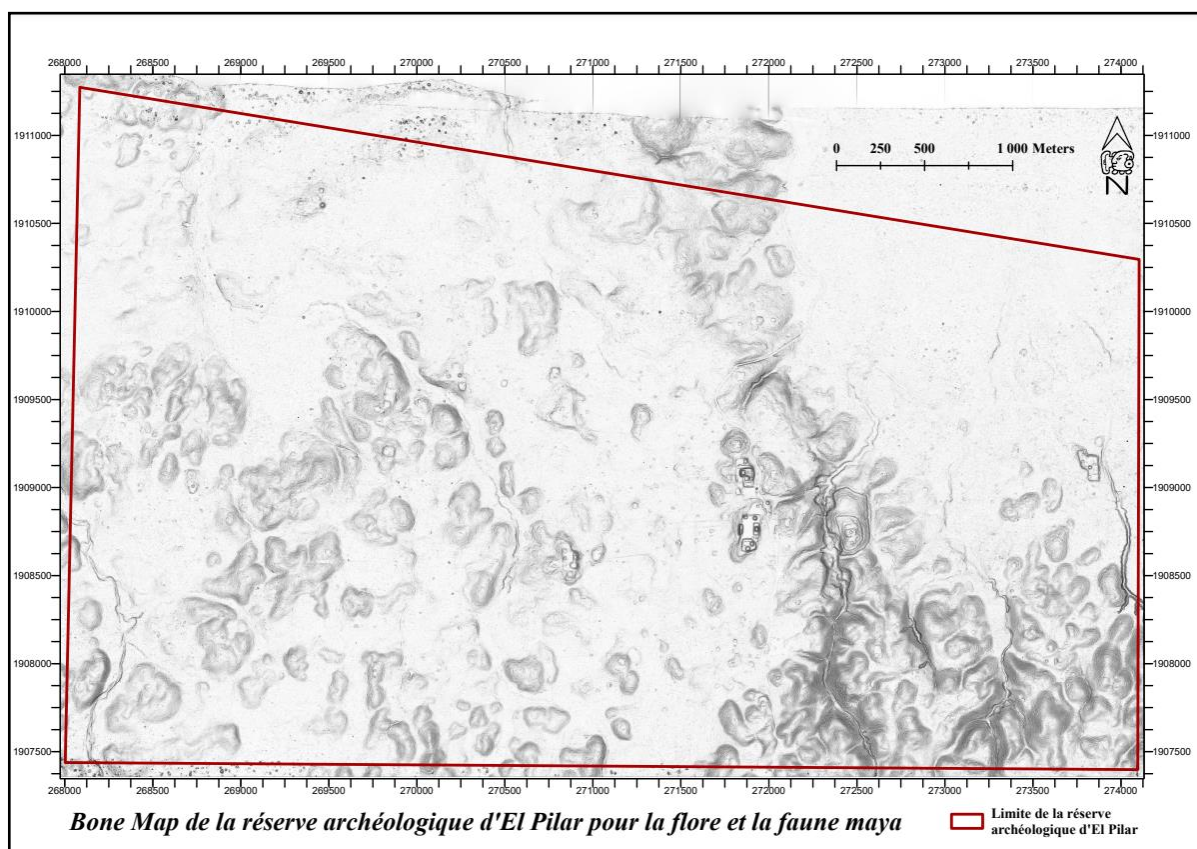


Figure 3 – Bone Map de la réserve archéologique d'El Pilar pour la flore et la faune maya

Source : Thomas James Pingel / Meso-American Research Center, 2013

Il convient de nuancer que parmi les différentes visualisations utilisées par les archéologues (comme celles mentionnées dans la section **I.5.1**), toutes ajoutent de la valeur à la compréhension de la scène. Cependant, il n'existe pas de technique ou de carte universelle qui puisse indiquer précisément au chercheur où concentrer ses efforts sur le terrain.

I.3.2 Dévoiler les détails significatifs du relief permettant de détecter les monticules

Via l'utilisation de la méthode « bonemapping » à El Pilar, trois avantages principaux sont discernables (Clarke et al., 2015) :

- ❖ Premièrement, elle repose sur un algorithme de traitement LiDAR conçu pour conserver les caractéristiques subtiles plutôt que de les éliminer. Cela présente l'avantage décisif de produire des modèles numériques de terrain (MNT) conçus pour conserver des traces humaines significatives, et non simplement localiser des cellules de sol (points individuels / éléments du sol capturés par le LiDAR lors de la collecte de données). En pratique, cela signifie que plus de caractéristiques sont conservées dans la « Bone Map » que dans d'autres images utilisant des techniques de traitement conventionnelles.
- ❖ Deuxièmement, au lieu de mettre l'accent sur une automatisation complète du processus de création des MNT, le « bonemapping » isole un petit ensemble de paramètres (forme, taille, orientation et densité spatiale) pour le traitement, permettant d'identifier et de conserver les caractéristiques subtiles associées aux activités humaines dans les données LiDAR sous la canopée forestière, plutôt que de simplement représenter les cellules de terrain individuelles. Cette approche favorise une meilleure analyse et interprétation archéologique en ajustant l'image pour fournir plusieurs perspectives sur un seul site.
- ❖ Troisièmement, la visualisation PSSM (Perceptually Shaded Slope Map) est utilisée pour représenter les pentes topographiques en utilisant des nuances de couleurs. Les zones avec des pentes douces sont représentées par des couleurs claires, tandis que les zones abruptes sont représentées par des couleurs sombres, créant un effet visuel tridimensionnel d'ombre pour percevoir rapidement les variations de relief et comprendre la géomorphologie du terrain. Ainsi, bien que les résultats de la première étape de création de la « Bone Map » puissent être examinés à l'aide d'autres techniques de visualisation, l'utilisation du PSSM facilite la détection et l'extraction d'éléments architecturaux caractéristiques importants par rapport à d'autres méthodes comparables (Pingel, 2014).

I.4 Références et prolongements : Les influences des travaux précédents

Il y a 24 ans, grâce à l'impulsion d'Anne Girardin, alors membre de l'association « Géomètres Sans Frontières », la première collaboration s'est concrétisée entre le Docteur Anabel Ford, responsable du projet archéologique d'El Pilar, et une étudiante de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes. Depuis, et ce annuellement, le projet est reconduit et des étudiants en fin de cursus sont amenés à participer à l'avancement et au développement de cette initiative.

Il en découle que bon nombre de travaux ont été réalisés auparavant, avec pour objectif une meilleure compréhension des caractéristiques techniques et spatiales composites de ce site, notamment par le biais de SIG et de la technologie LiDAR, apportant un regard novateur aux conséquents travaux du Docteur Anabel FORD. Seules les études en lien avec la problématique soulevée dans ce mémoire sont présentées ici.

I.4.1 Travaux de Gabriel MORDANT

Précédemment, il a été stipulé qu'il n'existe pas de technique ou de carte universelle permettant à l'archéologue de savoir exactement où concentrer ses efforts sur le terrain. Et pour cause, chaque méthode de visualisation LiDAR permet de distinguer des éléments que les autres ne peuvent pas nécessairement déceler.

C'est en partant du postulat précédent, entre autres, qu'en 2014, Gabriel Mordant s'est attelé à comparer différents types de visualisations permettant d'augmenter les chances de détection. Son travail intitulé « Seuil de détection des anciens sites de l'architecture Maya basée sur l'imagerie LiDAR : identification des sites sous la canopée » s'intéresse à quatre principaux types de visualisation, utilisés à des fins de détection des vestiges sous la canopée, à partir des données du LiDAR.

Parmi les quatre types de visualisation mis en parallèle, on retrouve le produit issu du procédé créé par Thomas J. Pingel, la « Bone Map », évoquée précédemment. Deux réalisations, issues du travail d'un ancien étudiant en 2013, Hugo Bihl font parties des données étudiées :

❖ La première est une représentation par niveau de gris correspondant à la quantité de lumière reçue par une surface élémentaire, c'est une visualisation SIM (Solar Insolation Modeling).

❖ La seconde est une représentation de la partie de ciel visible depuis un certain point. Les endroits voyant une plus grande partie du ciel sont plus brillants que ceux qui n'en voient qu'une petite, c'est une visualisation SVF (Sky View Factor).

Enfin, une visualisation par le biais de courbes de niveaux, créée à partir des données LiDAR à disposition, est à l'étude. Il parvient à la conclusion que la « Bone Map » a un meilleur taux de détection, tous éléments confondus. Cette dernière apparaît définitivement comme la meilleure source de détection (Gabriel Mordant, 2014).

I.4.2 Travaux de Juliette LARDILLEUX

Bien que proches phonétiquement, archéologie ne rime pas avec écologie. Porter un réel intérêt à la végétation au sein d'un site archéologique est assez novateur, et n'était pas préconisé avant l'acquisition LiDAR et l'apparition de certaines problématiques.

Le travail intitulé « Mise en place d'un protocole pour découvrir l'architecture des anciens sites Maya basé sur les images LiDAR : Modèles d'utilisation du paysage dans la forêt Maya » est le premier à aborder la notion de recensement de la végétation du site archéologique d'El Pilar. Il fait suite à la collecte des données LiDAR, qui pour rappel a été effectuée en 2012.

C'est ainsi qu'en 2014, pour la première fois, une démarche de recensement de la végétation a été entreprise. Cette dernière a subi quelques changements depuis, et sera développée plus longuement dans la partie II de ce rapport.

Une donnée intéressante étudiée était la quantité et la répartition de la végétation, en fonction de la présence ou non de caractéristiques architecturales, afin d'identifier d'éventuels liens. Néanmoins, cette dernière n'était pas complète, car elle était basée sur l'unique relevé de 220 hectares de l'année 2014, représentant un peu moins de 11% de la surface totale de la réserve d'El Pilar (Juliette Lardilleux, 2014)

Il aurait été intéressant de la compléter avec les données issues des années suivantes. Cependant, en 2014, le recensement se voulait exhaustif, mais depuis, il n'est effectué qu'en cas de présence avérée de monticules. De ce fait, la comparaison entre les données antérieures et plus récentes est possible exclusivement sur les zones où sont présents les monticules. Les données des zones sans monticule sont aujourd'hui obsolètes.

I.5 Enjeux et perspectives : Les défis de la modélisation de la végétation

Préalablement à l'abord de l'intégration des données au sein d'un SIG, il convient de mentionner les divers paramètres à prendre en compte ainsi que les problématiques qui se manifestent.

I.5.1 L'art ancestral de la domestication végétale chez les anciens Mayas

Différentes variétés d'espèces végétales sont privilégiées par les anciens Mayas en raison de leurs qualités dans la construction, entre autres. Il conviendra alors d'isoler les espèces végétales qui sont utiles dans ce domaine. Ensuite, il sera possible de déterminer comment elles sont utilisées dans ce processus spécifique. Il sera important de prendre en compte les composantes du modèle de construction utilisé, telles qu'elles seront détaillées plus tard dans ce rapport (via la section **III.1** et par le biais de l'annexe 9).

Toujours dans une optique de quantification, il serait intéressant de prendre en considération le type de croissance forestière qui caractérise les différentes espèces d'arbres.

Le cycle Milpa est un système d'utilisation des terres qui a été découvert pour la première fois lors de la conquête espagnole et qui garantit une disponibilité constante des ressources lorsqu'il est prévu sur un cycle asynchrone de 20 ans. Il comporte des champs ouverts mettant l'accent sur les cultures annuelles, une succession de plantes vivaces axée sur les produits utilisés à la maison et pour l'entretien, ainsi que des forêts à couvert dense pour les fruits et les produits utilisés dans la construction.²

Il est important de noter que les arbres utilisés pour la construction doivent répondre à des critères spécifiques, tels qu'une taille et une circonférence particulières, par exemple. Ces critères sont liés aux périodes de croissance, qui varient en fonction de l'espèce et de l'utilisation prévue. Via une modélisation théorique existante du fonctionnement de ce système agricole traditionnel au sein d'ArcGIS Pro, il serait possible de déterminer les surfaces associées à ces différentes périodes de croissance. En définitive, cela permettrait de spécifier une répartition effective des différentes composantes du modèle de construction sur lequel s'appuyer.

² Annexe 4

I.5.2 Concaténation des données des différentes années

Bien que la démarche de recensement n'ait pas connue de remaniement drastique, elle n'est pas exempte de défauts. Depuis 2014, à l'exception des années 2020 et 2021 en raison de la pandémie mondiale, des problèmes récurrents ont été rencontrés chaque année.

I.5.2.1 Découvertes de nouvelles espèces : Entre opportunités et défis

Lors de la première année de collecte de données, 142 espèces végétales ont été recensées. En 2015, ce nombre s'amointrissait à 136. Depuis, il n'a cessé de fluctuer d'une année à l'autre. La dernière donnée disponible, issue de l'année 2022, révèle la présence de 180 espèces végétales potentielles différentes.

I.5.2.2 Le problème engendré par les multiples dénominations

Le problème des multiples dénominations est étroitement corrélé à celui initialement évoqué. En effet, le projet archéologique d'El Pilar est un projet multilinguistique, faisant intervenir différents acteurs et intervenants de nationalités, de cultures et de langues différentes. De surcroît, cela peut entraîner des erreurs de compréhension, et ce notamment lors du processus de dénomination des espèces végétales issues de la forêt maya.

Diverses appellations existent pour une même espèce, incluant le nom scientifique, le nom en langue maya, le nom en espagnol et le nom en anglais. Pour résoudre cette contrainte, il sera dans un premier temps nécessaire d'identifier les noms qui désignent les mêmes espèces afin d'éviter les doublons et de quantifier précisément le nombre d'espèces et leurs évolutions au cours du temps.

I.5.3 En quête de fiabilité : la faille du processus d'acquisition

Il est envisagé, à terme, d'obtenir une estimation des coûts de construction de logement en termes de matériaux. Ceci permettra de valider ou de réfuter l'hypothèse selon laquelle la forêt, dans son état actuel, dispose des ressources arboricoles adéquates. Toutefois, il est évident que le modèle de recensement de la végétation n'est pas particulièrement adapté à cette tâche. Ce modèle repose sur une classification binaire reposant sur la présence ou l'absence d'une espèce. La valeur « 1 » est assignée lorsque la présence de l'espèce est vérifiée, et « 0 » est attribué lorsqu'elle est absente.

II Intégration des données de végétation dans la géodatabase d'El Pilar pour une analyse spatiale avancée

II.1 Acquisition

Depuis 2014, la réserve d'El Pilar est décomposée en 500 quadrants, tous de forme et de dimension égale (250 x 200 mètres). Ces derniers font partie intégrante de 9 grilles de taille disparate. Chaque grille est découpée en lignes et en colonnes qui sont définies par des index, les lettres sur l'axe horizontal et les chiffres sur l'axe vertical. Ils ont pour vocation de faciliter la nomenclature des données, ainsi que les processus de recherche, d'acquisition et de déplacement, comme l'illustre la figure 4.

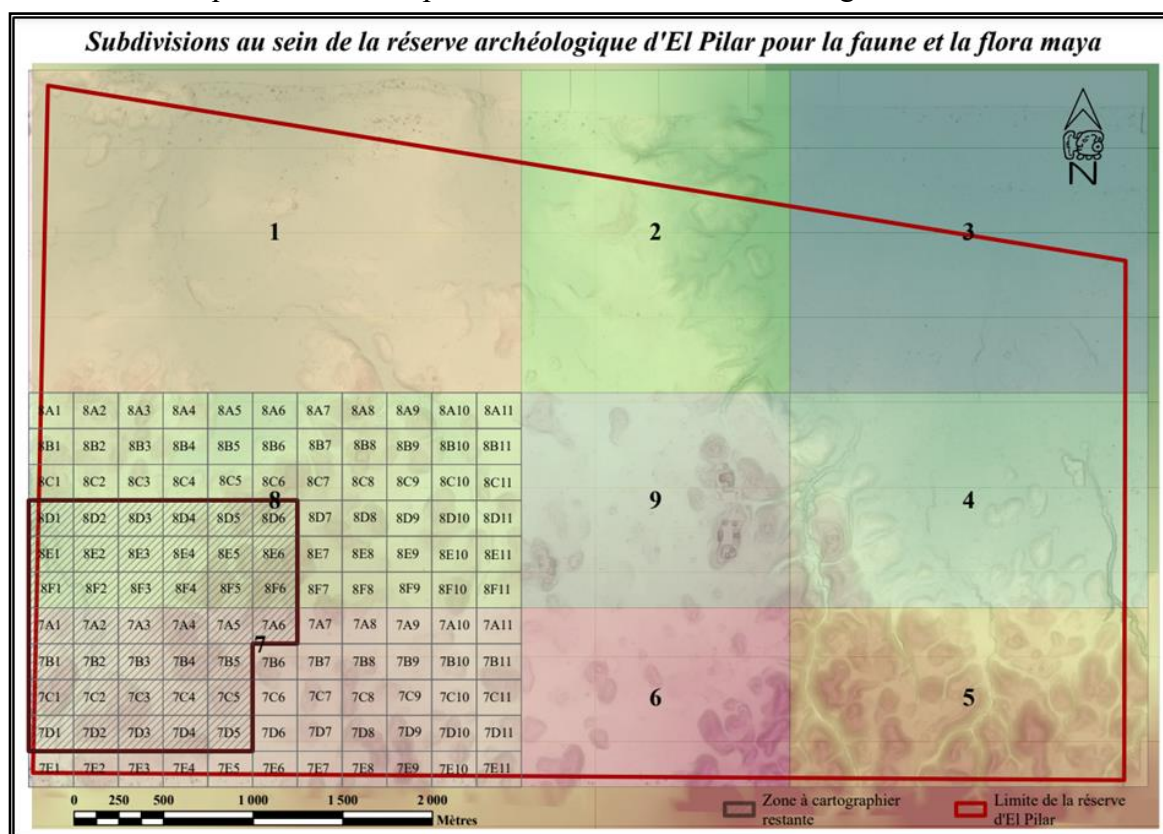


Figure 4 – Subdivisions au sein de la réserve archéologique d'El Pilar pour la flore et la faune maya

Source : MesoAmerican Research Center

Le processus de recensement de la végétation est mené simultanément à la cartographie du site. En 2023, il restait une superficie d'environ 2 kilomètres carrés à cartographier, comme indiqué sur la carte ci-dessus. Par conséquent, seules les données concernant la végétation de cette zone ont été collectées, étant donné que les informations précédemment obtenues sont supposées couvrir le reste de la réserve archéologique.

II.1.1 Utilisation de la « Bone Map » pour l'investigation

Il convient de préciser que seul le processus d'acquisition lié aux données de la végétation sera développé ici. Le travail de Juliette Lardilleux (2014) a été de mettre en place un protocole d'acquisition des données, quelles qu'elles soient. Ce dernier est depuis utilisé comme protocole par défaut, il est donc nécessaire de se référer à son travail.

L'utilisation de la « Bone Map », combinée à la décomposition en quadrants, permet dans un premier temps de créer des cartes, (via une mise en page personnalisée sur ArcGIS Pro) à l'échelle d'un quadrant, à savoir 1 : 1000. Elles sont donc porteuses d'informations, notamment sur la topographie du terrain, mais plus généralement sur les sites éventuels à investiguer, comme le met en évidence la figure 5.

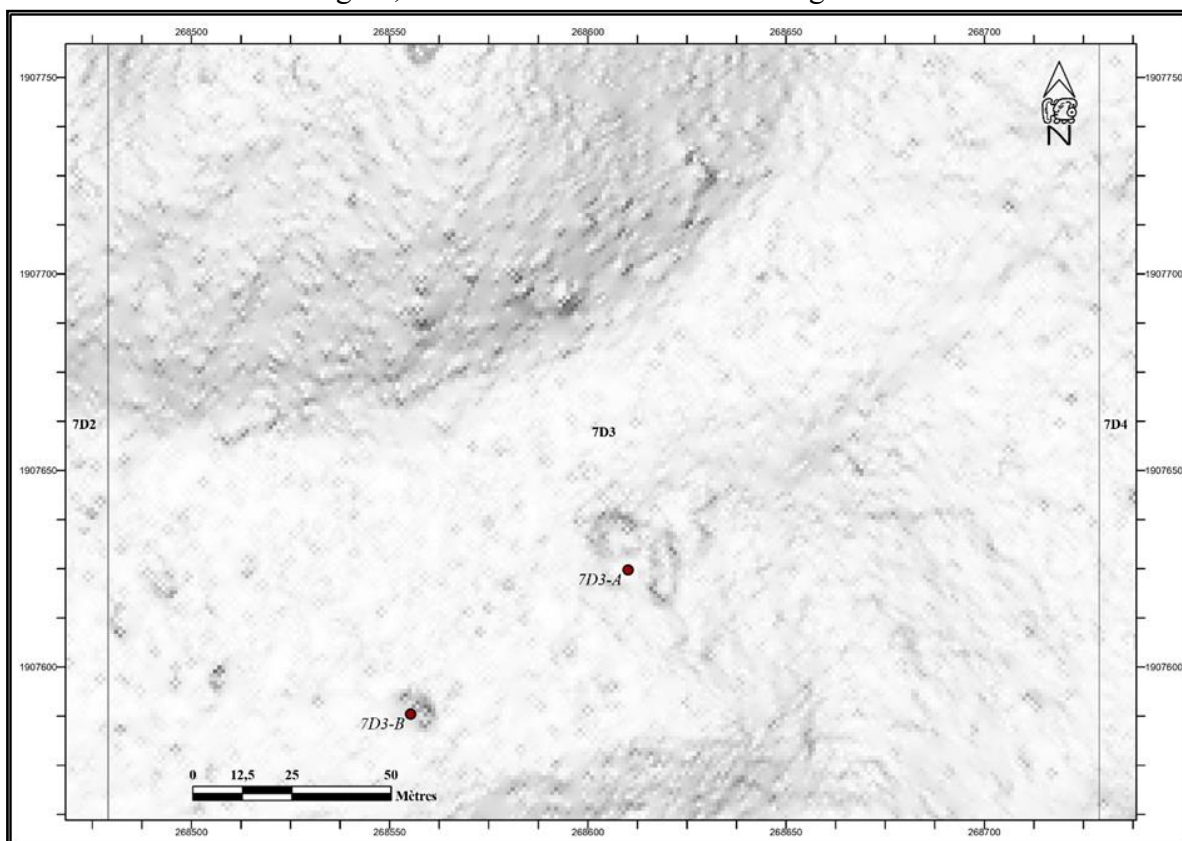


Figure 5 – Exemple de mise en page utilisant la « Bone Map » et la division en quadrant

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 08/02/2023

Sur la carte ci-dessus, on observe deux sites à explorer localisés dans le quadrant 7D3, à proximité des points (7D3-A et 7D3-B) issus de la couche « GoTo_Concordance », sous la forme d'ovales / de cercles. Les points GoTo sont les points d'origine utilisés pour la navigation sur le terrain afin d'identifier, entre autres, les potentiels monticules.

Ce sont donc deux sites potentiels de recensement de la végétation.

II.1.2 Transfert des données de la géodatabase vers les GPS

Pour se déplacer dans la densité de la jungle et atteindre les éventuels monticules, l'utilisation de GPS (Global Positioning System) est nécessaire. Les modèles utilisés sont les Garmin GPSMAP® 64s, qui sont adaptés à la randonnée. Ils sont choisis pour leur robustesse et leur étanchéité.

Il est donc impératif de transférer les coordonnées des points issues de la géodatabase d'El Pilar utiles à la recherche des monticules, les points de la couche « GoTo_Concordance », aux GPS employés sur le terrain. En fonction des besoins, tous les points de cette même couche, ou seulement ceux faisant partie intégrante des quadrants à investiguer peuvent être sélectionnés, par le biais d'une sélection attributaire classique sur ArcGIS Pro.

La figure 6 précise les différentes étapes nécessaires à ce transfert de données.

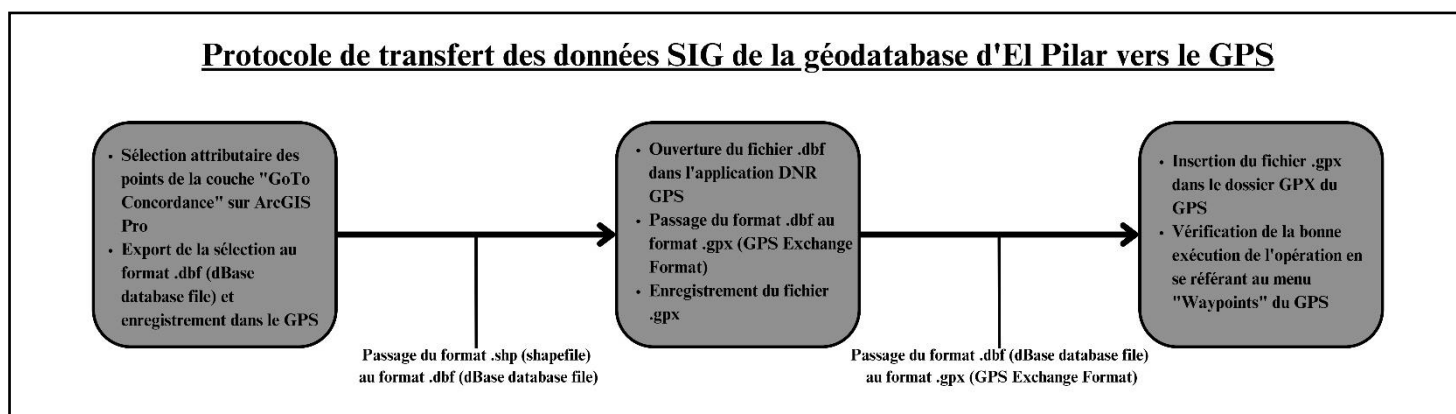


Figure 6 – Schéma explicatif du protocole de transfert des données SIG de la géodatabase d'El Pilar vers le GPS

Source : Personnelle

II.1.3 Précision et application du GPS sur le terrain

En premier lieu, il convient de parler de la précision associée aux GPS utilisés. Cette dernière peut varier en fonction de divers facteurs tels que la couverture nuageuse, la présence d'obstacles, les interférences électromagnétiques et la réception du signal GPS.

Dans un environnement dense en couvert végétal, tel que celui présent, cela peut avoir un impact significatif sur la réception du signal GPS. Selon les spécifications annoncées par le fabricant, la précision du GPS est généralement de l'ordre de 3 mètres. Cependant, dans des situations où la canopée (le couvert végétal) est moyenne ou dense, la précision peut être réduite et atteindre environ 5 à 6 mètres.

Bien que cette précision ne soit pas concevable dans des chantiers topographiques ordinaires, celle-ci est tout à fait adaptée à des travaux de cette envergure. À terme, l'objectif des archéologues est de produire une carte de l'ensemble de la réserve archéologique d'El Pilar, et non pas une carte de précision.

Dans un premier temps, le GPS va servir à la navigation, de sorte à s'orienter et à se diriger vers les sites à explorer. À l'arrivée, la vérification est effectuée pour déterminer s'il s'agit bien d'un monticule (ou éventuellement d'un groupe de monticules), ou simplement d'un élément mal interprété identifié à partir de l'imagerie LiDAR.

II.1.4 Recensement du patrimoine végétal et rôle des « Maya Forest Gardeners »

Une fois la présence d'un ou plusieurs monticule(s), le processus de recensement de la végétation peut débuter. Il est essentiel de noter que ce répertoriage est limité à une distance de visibilité moyenne de 15 mètres, qui correspond à la portée de vision habituelle dans la forêt et couvre un angle de 360 degrés.

Subséquemment, l'objectif sera de modéliser cette couverture afin d'obtenir un pourcentage théorique de la surface couverte à partir de cette collecte de données.

Cet inventaire s'effectue par le biais d'un formulaire spécifique.³ Dans un premier lieu, la densité de la canopée et de la sous végétation (ouverte, moyenne ou dense) va être consignée. Ensuite, c'est au tour de la topographie du terrain (plat, pentu ou sommet de colline) d'être inscrite. En second lieu, les coordonnées du site sont annotées.

Le système de coordonnées projetées par le biais duquel l'équipe archéologique travaille est le WGS 1984 UTM (Universal Transverse Mercator) Zone 16. Dans le système UTM, les coordonnées sont généralement exprimées en mètres. Chaque zone est projetée sur un plan cartésien bidimensionnel, où l'axe horizontal est appelé l'axe des est (Easting) et l'axe vertical est appelé l'axe des nord (Northing).

Un point est pris au GPS et renseigné suivant les spécifications de la couche « GoTo_Concordance ». Par la suite, toutes les espèces végétales de la forêt maya observables sur le site sont alors répertoriées en utilisant un indexage simple.

³ Annexe 5

Le recensement de ces nombreuses espèces végétales se fait grâce à l'expertise des « Maya Forest Gardener », qui sont des descendants directs des anciens Mayas et qui possèdent une expertise dans la compréhension de tous les aspects de la connaissance environnementale des forêts et des jardins. Ils connaissent les animaux, reconnaissent les composantes de l'environnement, comprennent le fonctionnement des arbres et leur cycle de vie. Ils sont intimement en phase avec l'environnement et jouent donc un rôle prépondérant dans ce processus de répertoire.⁴

II.1.5 Optimisation de l'acquisition de données dans les zones à faibles volumes de données

Après avoir achevé la collecte de données sur la végétation dans les quadrants restants à topographier, la décision a été prise de se concentrer sur les zones déjà cartographiées avec une faible fréquence ou une absence de monticules. Étant donné que le recensement était axé sur la présence confirmée de monticules, il a été convenu d'élargir les données en étudiant la végétation dans ces zones à faible présence de monticules.

Pour ce faire, l'outil d'analyse spatiale « Densité de noyau », disponible sur ArcGIS Pro, a été utilisé. Ce dernier permet d'analyser et de représenter la distribution spatiale des entités d'un ensemble de données géographiques. Il est basé sur une approche utilisant des noyaux pour estimer la densité de points dans l'espace. En assignant des valeurs de densité à chaque emplacement en fonction de la proximité des points voisins, il crée une surface de densité lisse.

Les valeurs de densité sont représentées par une échelle de couleurs, les couleurs plus intenses indiquant une densité plus élevée. Le raster créé à la suite de l'utilisation de cet outil est issu de la couche « GoTo_Concordance ».

La méthode de classification par intervalle géométrique est préférable pour une classification plus réaliste. Les intervalles sont déterminés automatiquement à l'aide d'une progression géométrique qui suit un rapport constant. Ainsi, les valeurs sont distribuées logarithmiquement. Cette approche facilite la visualisation des différences entre les valeurs des données. Les intervalles sont conçus de manière que chaque classe contienne un nombre équivalent de valeurs, permettant de mettre en évidence les variations significatives et de représenter de manière plus complète la gamme des données.

⁴ <https://mayaforestgardeners.org/who-we-are/>

La figure 7 illustre le produit issu de cette classification.

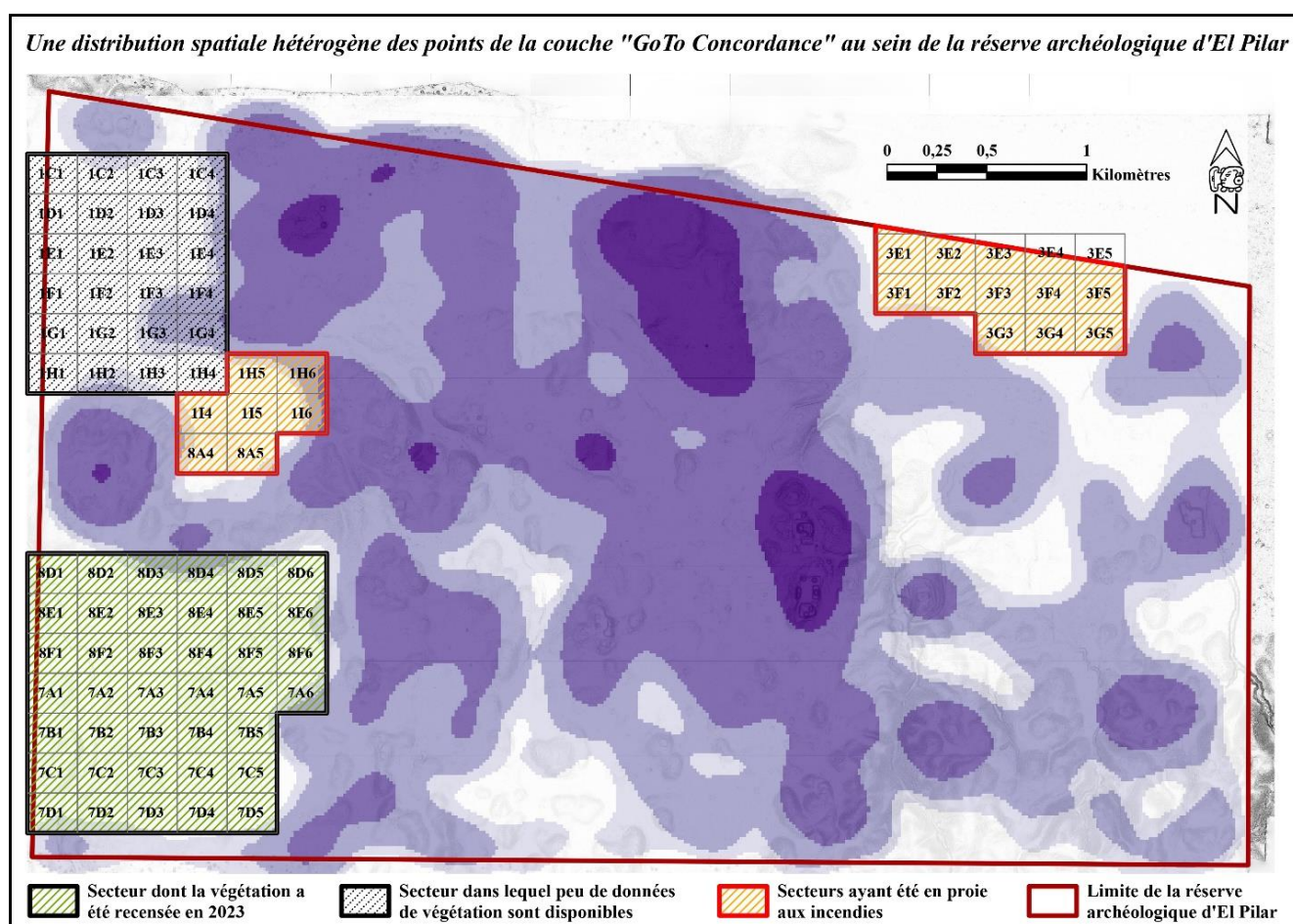


Figure 7 – Carte de distribution spatiale du volume de données en lien avec la végétation au sein d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 08/02/2023

La classification a révélé trois secteurs principaux présentant un faible volume de données, mais qui auraient mérité d'être approfondis. Deux de ces secteurs se trouvent au Nord-Est du site, tandis que le dernier se situe au Nord-Ouest. Cependant, une vérification sur le terrain a révélé que deux d'entre eux avaient été gravement affectés par divers incendies au cours de la dernière décennie.

Finalement, l'attention s'est portée sur le secteur nord-est, composé de 24 quadrants distincts. En conséquence, le processus de collecte décrit dans la section II.1.4 a été suivi rigoureusement, mais en raison de l'absence de monticules dans ces zones (et par conséquent, de points et coordonnées associés), une légère variation a été apportée. À la place, des points de repère (ou « waypoints ») ont été utilisés via le GPS. La dénomination attribuée était une combinaison du numéro du GPS suivi du numéro de waypoint suggéré.

Il convient de noter que ce processus est identique à celui utilisé lorsque l'équipe archéologique découvre sur le terrain des monticules qui n'avaient pas été révélés par l'imagerie LiDAR.

Dans le but d'assurer une répartition équilibrée des points d'échantillonnage pour le recensement de la végétation dans les vingt-quatre quadrants, la sélection de quatre sites aux coins de chacun d'eux a été privilégiée. Cette approche visait à obtenir une distribution spatiale uniforme et à éviter les doublons, c'est-à-dire la présence d'arbres identiques observables à différents endroits, ce qui peut se produire lorsque la canopée est ouverte. Cela a abouti à la création d'environ une centaine de nouveaux sites, chacun possédant son propre inventaire de la végétation. Lorsque ces données seront intégrées dans la géodatabase d'El Pilar, elles viendront étoffer le volume de données.

La figure 8 résume les différentes démarches de collectes de données abordées précédemment.

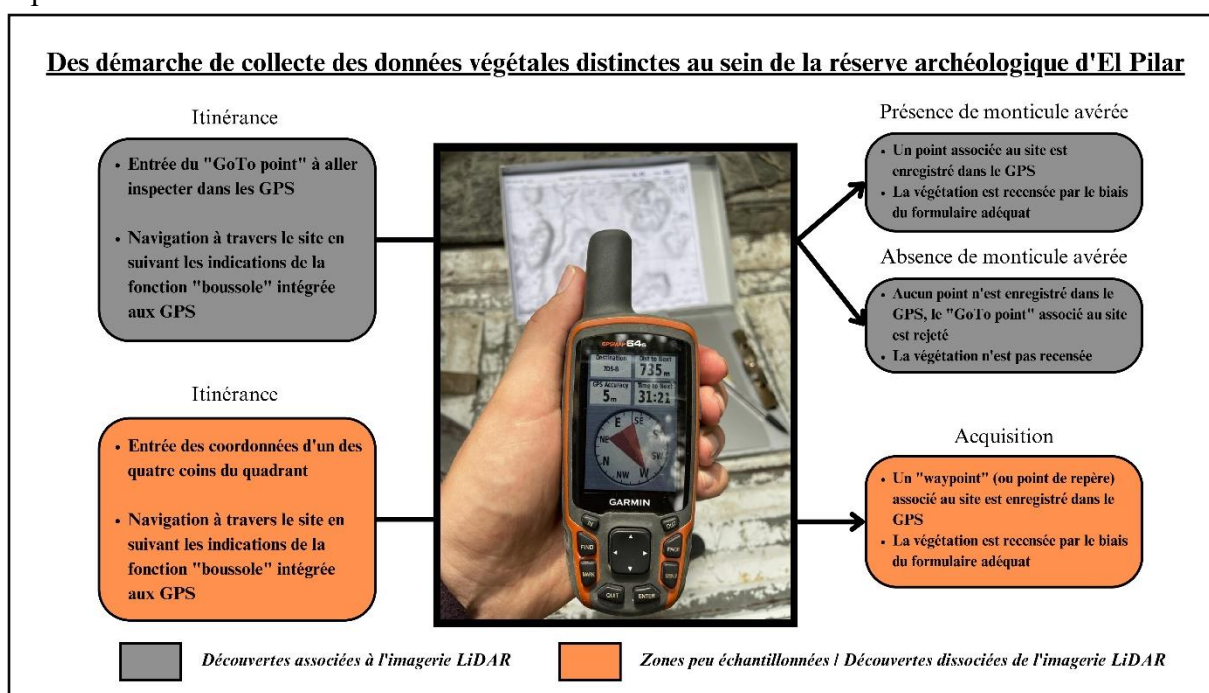


Figure 8 – Résumé des différents processus d'acquisition des données de végétation au sein du site d'El Pilar

Source : Personnelle

Dans le cadre des découvertes associées à l'imagerie LiDAR, on ne parle pas de points de repères car on connaît au préalable les coordonnées de la donnée issue de la couche « GoTo_Concordance », basée sur l'imagerie LiDAR. La différence réside dans le fait que les « waypoints » sont déterminés manuellement par les équipes sur le terrain afin d'étoffer les données liées à la végétation dans les zones peu échantillonnées.

II.2 Intégration

Avant de parler d'intégration des données, il convient de mentionner comment le problème de concaténation des différentes espèces, abordé dans la partie 1, a été résolu.

Pour accomplir cette tâche, l'expertise des « Maya Forest Gardeners » a été sollicitée. Narciso Torres, l'un d'entre eux, a minutieusement prospecté pour éliminer les doublons et a établi un répertoire final de 163 espèces. Ensuite, une correspondance entre les recensements précédents et la nomenclature de ces espèces a été établie.

II.2.1 Établissement de méthodes de géoréférencement préalables adéquates

Avant d'agencer les données, il fallait les géoréférencer. Pour cela, les données collectées en 2023 ont été intégrées dans un tableur unique. Cette étape spécifique a nécessité l'ajout de deux colonnes, nommées respectivement « GoTo Easting » et « GoTo Northing », pour intégrer les coordonnées de chaque site issues des formulaires de recensement de la végétation de l'année en question.

La raison pour laquelle le processus d'exportation des données GPS n'a pas été développé et pourquoi ce mode opératoire n'a pas été retenu réside dans le fait que les données ont été collectées par différentes personnes, à l'aide de différents modèles de GPS, et ce depuis 2014. Lors de l'exportation de ces données, on se retrouve avec une couche de points distincte pour chaque GPS utilisé et pour chaque jour de collecte. Étant donné que la période de collecte s'est étendue sur plusieurs mois, cela a entraîné un nombre considérablement élevé de couches de données à fusionner entre elles.

En second lieu, après concaténation, il était nécessaire de trouver une méthode rapide et efficace pour attribuer des coordonnées géographiques aux données des années précédentes. Les tableurs contenant les données de ces années-là ne comprenaient pas les coordonnées de chaque site étudié. Cependant, ils possédaient tous une colonne intitulée «GIS_Name», correspondant au nom d'origine du point GoTo utilisé pour localiser la caractéristique. Pour rappel, les points GoTo sont des repères utilisés pour se déplacer sur le terrain et repérer d'éventuels éléments architecturaux.

Si la présence d'un monticule est constatée, cela indique que le point où la végétation a été répertoriée se trouve exactement à la même position que le point GoTo.

Dans une optique de faciliter le géoréférencement sur ArcGIS Pro, il s'avérait donc possible d'établir une relation entre la table contenant les données de végétation de 2014 à 2022 et la couche « GoTo_Concordance » en utilisant le champ « GIS_Name ».

II.2.2 Structuration des données liées à la végétation dans un tableur

Parlons maintenant de l'agencement des données au sein de la future table attributaire. Elle est composée de plusieurs champs, comprenant les 163 espèces distinctes, la date d'acquisition des points, le Datum_ID, le GIS_Name, ainsi que les trois composantes du terrain (canopée, sous-végétation et topographie).

En outre, comme mentionné précédemment, deux colonnes ont été spécifiquement ajoutées pour les coordonnées, lesquelles ont été renseignées exclusivement pour l'année 2023. Pour chaque site, lorsqu'une espèce était présente, une valeur de «1» était attribuée dans la case correspondante de la colonne. Si l'espèce était absente, la case restait vide.⁵

II.2.3 Géoréférencement et intégration du tableur de végétation dans le SIG

Précédemment, une méthode en deux étapes a été envisagée pour géoréférencer les données de végétation. La première étape s'est avérée concluante, permettant l'affichage facile des points acquis en 2023. Cependant, lors de la deuxième étape, qui visait à établir une relation entre la table contenant les données de végétation de 2014 à 2022 et la couche « GoTo_Concordance », c'est finalement le champ « Datum_ID » qui a été utilisé. Le « GIS_Name » est le nom original du point GoTo utilisé pour découvrir une caractéristique architecturale, avant que le groupe ne soit renommé avec un « Datum_ID », qui devient alors le nom « officiel » de cette caractéristique après sa découverte.

Dans l'optique d'obtenir un tableur final uniforme, il était préférable que toutes les entrées le composant disposent de coordonnées, de sorte qu'il soit plus facilement intégrable dans un SIG. En premier lieu, les données des années 2014 à 2022, non géoréférencées, ont été concaténées séparément dans un tableur distinct intitulé « Vegetation_2014-2022 ». Dès lors, l'objectif recherché était l'affichage des coordonnées propres à chacune des entrées du tableur mentionné, via une jointure avec la couche « GoTo_Concordance » par le champ commun « Datum_ID ».

⁵ Annexe 6

Les traitements réalisés pour intégrer les coordonnées des points des années antérieures dans le tableau final nommé « Vegetation_Complete » sont retranscrits à travers la figure 9.

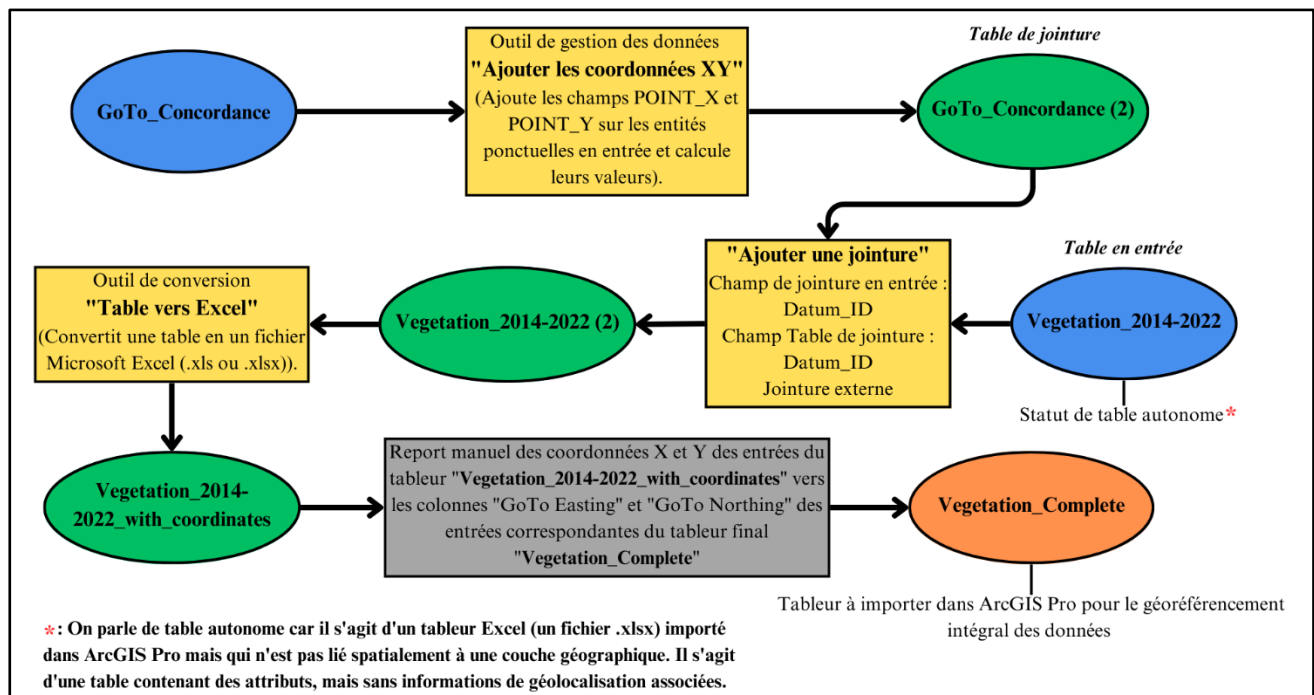


Figure 9 – Traitements effectués pour palier au problème de géoréférencement des données de végétation

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Pour finaliser le processus d'intégration, il suffisait d'afficher les coordonnées X et Y de la table autonome « Vegetation_Complete » via l'option « Afficher les données X et Y » (ou « XY Table to Point »). Cela a permis de générer une couche de points représentant les sites où la végétation avait été recensée.

II.2.4 Simulation dans un SIG pour une meilleure gestion du cycle Milpa

Afin d'affiner la quantification des matériaux nécessaires à la construction des maisons mayas, il est important de déterminer la surface du ou des cycles du cycle Milpa dans le(s)quel(s) on retrouve les espèces d'arbres nécessaires au processus de construction.

Pour prendre en compte cette variable, la modélisation du processus de recherche de terres éligibles, développé par Justin Tran, un membre de l'équipe d'El Pilar, a été utilisée. Initialement, elle a été développée pour étudier la faisabilité de l'agriculture pratiquée par les Mayas modernes à El Pilar dans un environnement ancien. Son objectif était de localiser les terres cultivables et de déterminer leur adéquation pour le cycle Milpa. Les critères d'évaluation incluaient la disponibilité suffisante de terres pour mener à bien le cycle (une illustration de cette modélisation est consultable via l'annexe 7).

Ce paramètre a principalement été déterminé par les limites de la pente. Les recherches de Scott Fedick sur les limites agricoles de la pente maya ont été utilisées pour identifier toutes les terres d'El Pilar qui dépassaient la pente privilégiée pour l'agriculture (7 à 15%) (Fedick, 1992, 1995). Certaines contraintes ont été incorporées, telles que l'absence de terres cultivables dans les zones architecturales ou la présence potentielle de jardins d'agrément de 4000 m² autour des structures d'habitations.

Par le biais d'une combinaison entre les terres qui sont trop pentues pour être cultivées avec celles qui présentent des obstacles à l'agriculture, il s'est avéré possible d'identifier toutes les terres incultivables. En inversant simplement cette couche, il a été ainsi rendu possible de définir la surface de terres cultivables à El Pilar.

À l'issue de la campagne de collecte de données finale de 2023, la surface cultivable totale a été estimée à 13,20 kilomètres carrés. Parmi cette composante, 2,64 kilomètres carrés correspondent à l'étape initiale nommée Milpa, 5,28 kilomètres carrés correspondent respectivement à l'étape secondaire et à l'étape mature.

Le fonctionnement de la modélisation utilisée est simple : chaque carré est attribué à un hectare du cycle Milpa et se voit assigner une valeur « Année » correspondant à sa position dans le cycle de 20 ans. À chaque étape de 0 à 19, l'algorithme augmente la valeur de l'année de 1 pour chaque carré, en utilisant un modulo 20. La symbologie spécifique est utilisée pour représenter visuellement les différentes étapes : les valeurs de 0 à 3 sont colorées en jaune pour l'étape « milpa », de 4 à 11 en vert clair pour l'étape secondaire, et de 12 à 19 en vert foncé pour l'étape mature.

II.3 Application et intégration

Les données végétales, intégrées dans la géodatabase d'El Pilar, ouvrent désormais un monde de possibilités et d'applications florissantes.

II.3.1 Couverture spatiale de la végétation

Afin d'obtenir une vision théorique de la répartition spatiale de la végétation recensée dans la réserve archéologique d'El Pilar, trois types de canopées forestières ont été considérées : ouverte, moyenne et dense.

Les données ont toujours été collectées en maintenant une distance de visibilité effective de 12 à 15 mètres, quelle que soit la densité de la canopée forestière.

Cependant, des distances moyennes approximatives basées sur le champ de vision perçu pour chaque type de canopée forestière ont été attribuées. Différentes valeurs ont été retenues en fonction de la catégorie, avec des mesures de 25 mètres pour la canopée ouverte, 15 mètres pour la canopée moyenne et 5 mètres pour la canopée dense.

Le processus de création de zones tampons pour tous les sites où la végétation a été recensée est décrit dans la figure 10. Il a permis d'obtenir des valeurs surfaciques. Ces traitements ont été réalisés pour les trois types de canopée en utilisant des zones tampons égales aux distances moyennes approximatives mentionnées dans le paragraphe précédent.

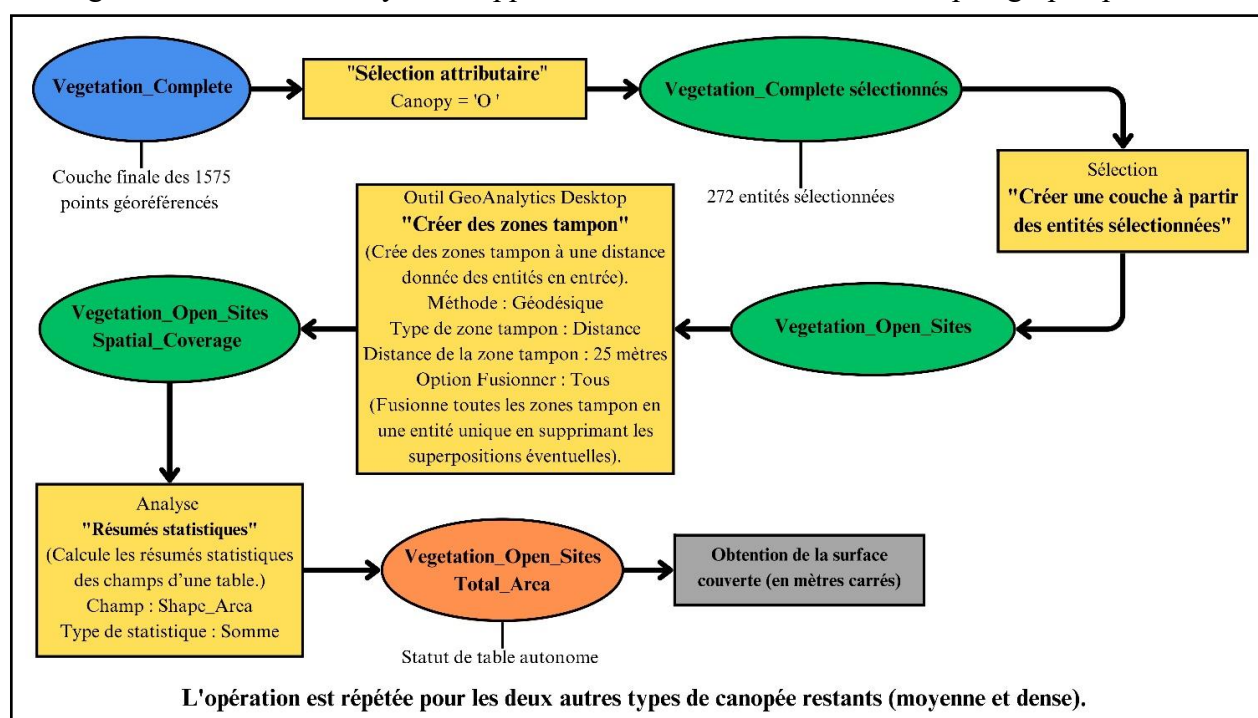


Figure 10 – Traitements effectués pour déterminer la couverture spatiale des données de végétation

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

La valeur de la couverture spatiale des données de végétation est obtenue en additionnant les trois surfaces totales répertoriées dans le tableau 1.

Couverture spatiale totale de la végétation (kilomètres carrés)	1,3
Surface cultivable de la réserve archéologique d'El Pilar (kilomètres carrés)	13,2
Surface totale de la réserve archéologique d'El Pilar (kilomètres carrés)	20,4
Couverture spatiale de la végétation par rapport à la surface de terres cultivables (%)	9,8
Couverture spatiale totale de la végétation par rapport à la surface totale (%)	6,4

Tableau 1 – Couverture spatiale de la végétation par rapport à la surface cultivable et totale du site d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Sans surprise, la couverture spatiale totale de la végétation est relativement faible par rapport aux surfaces comparées. Cela s'explique notamment par le nombre de sites recensés et par les valeurs attribuées lors de la création des zones tampons.

II.3.2 Composition et distribution de la canopée forestière d'El Pilar

En analysant les données issues des manipulations précédentes, les statistiques suivantes ont été condensées par le biais du tableau 2.

	Canopée forestière		
	<i>Ouverte</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Dense</i>
Nombre de sites / entités	272	1249	46
Proportion des sites par rapport au total (%)	17	80	3
Surface couverte (mètres carrés)	500967	825130	3371
Pourcentage de la surface couverte (%)	37,7	62,1	0,2

Tableau 2 – Composition et distribution de la canopée forestière de la réserve archéologique d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

On constate que la canopée moyenne est la plus répandue et couvre une surface considérable, tandis que la canopée dense est moins présente et exerce une influence très limitée sur la surface totale. La canopée ouverte se situe entre les deux en termes de nombre de sites, de surface couverte et de pourcentage de la surface totale. Bien que cela ne concerne que 17% des sites recensés, elle englobe une part significative de la surface totale, composant ainsi plus d'un tiers de cette dernière.

II.3.3 Cartographie précise de la distribution des arbres de copal

Grâce à la couche de points représentant les sites où la végétation a été indexée, il est désormais possible de produire de nombreuses cartes.

Les cartographies du copal ont été créées pour « l'Inspectoría del Instituto de Antropología e Historia » basée à Melchor, au Guatemala. L'objectif était de comprendre les activités des Copaleros (personnes spécialisées dans la collecte, la production ou le commerce du copal) qui pratiquaient illégalement la saignée des arbres de copal au sein de la réserve archéologique d'El Pilar, une zone protégée.⁶

⁶ Annexe 8

III Application : Quantification des coûts en ressources naturelles des abris pour les anciens Mayas

III.1 Conception d'un modèle d'habitat réduit et simplifié

Avant d'entreprendre les calculs, il était crucial d'établir un modèle d'habitat qui formerait la fondation de ces calculs. La conception est condensée par le biais de l'annexe 9.

III.1.1 Analyse de la répartition des espèces végétales éligibles : Les trois catégories en perspective

Le modèle d'habitation ayant été épuré en trois catégories distinctes, il convient désormais d'aborder la répartition des espèces végétales à vocation de construction selon cette division, consultable par le biais du tableau 3.

Total de poteaux	Total de poutres	Total de chevrons
17	43	40

Tableau 3 – Répartition des 53 espèces végétales (hors toiture) selon les trois catégories d'éléments structurels

Source : Personnelle

Il est important de noter qu'une espèce végétale peut appartenir à une seule, à deux, voire à l'ensemble de ces catégories, comme le démontre la figure 11.

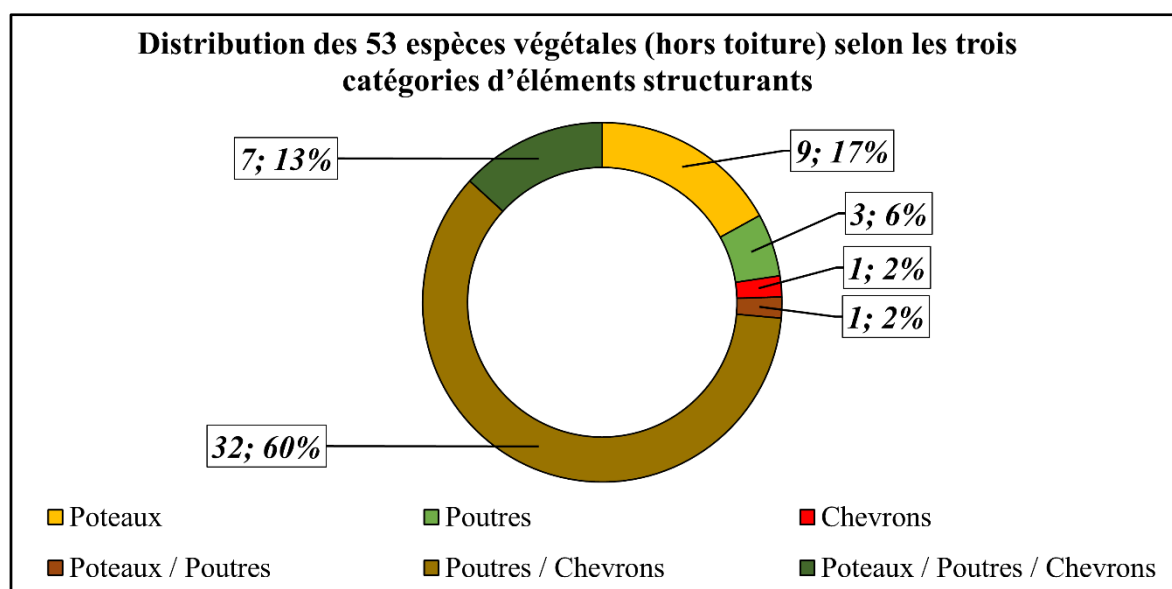


Figure 11 – Distribution des 53 espèces végétales (hors toiture) selon les trois catégories d'éléments structurels

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Les vocations ont une distribution inégale, avec plus de poteaux et moins de poutres et chevrons.

Les espèces ayant une double vocation poutres/chevrons sont sur-représentées, formant 60% des spécimens, tandis que les autres combinaisons sont rares voire absentes. Les espèces à triple vocation représentent environ 13% du total.

III.1.2 Composants structurels des abris mayas : Une approche quantitative

À partir du tableau répertoriant toutes les espèces, un nouveau document a été créé, cette fois-ci excluant les 108 espèces végétales non pertinentes pour la construction. Après son incorporation dans le SIG, une table de synthèse a été créée à l'aide de l'outil « Résumé statistiques ». Tous les champs ont été sommés pour obtenir une première quantification des matériaux disponibles, illustré par le biais de la figure 12.

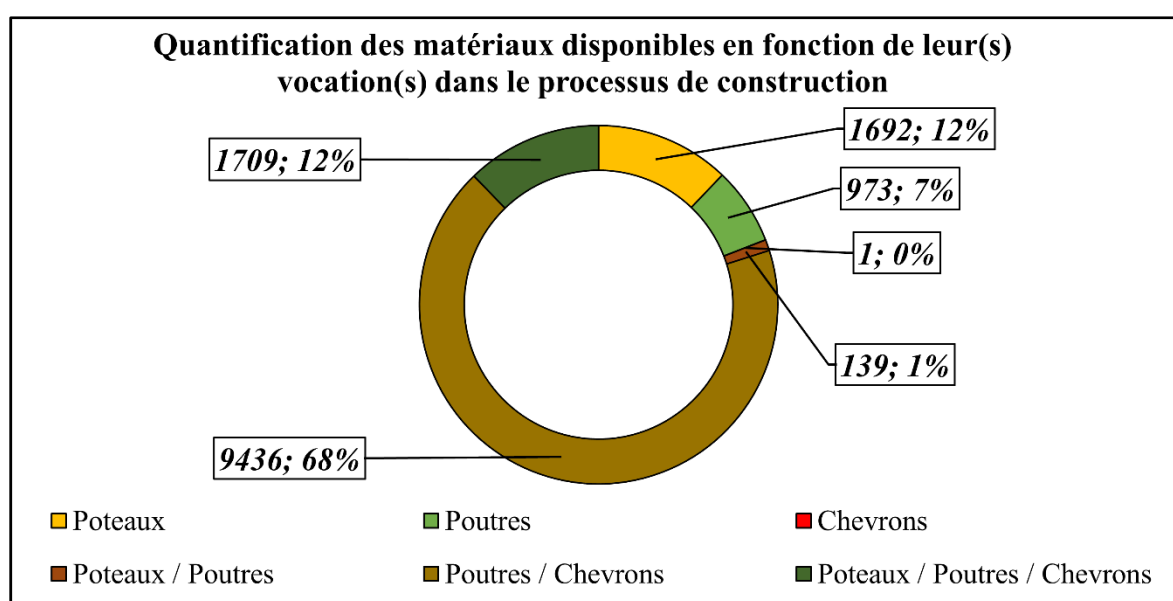


Figure 12 – Quantification des matériaux disponibles en fonction de leur(s) vocation(s) dans le processus de construction

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

De façon prévisible, on retrouve une distribution identique à celle observable par le biais de la figure 11. Pour rappel, il s'agit d'un recensement de type présence / absence. Lorsqu'une espèce est repérée lors du recensement de la végétation, elle est considérée comme un élément unique. De plus, chaque arbre est considéré comme une pièce de structure et ne peut donc être utilisé qu'une seule fois dans le processus de construction.

Cependant, cette règle ne vaut pas pour les matériaux de toiture. Selon Alfonso Tzul, un « Maya Forest Gardeners », les palmiers de *Sabal Mauritiiformis* utilisés pour la construction sont abondants et robustes uniquement à la phase mature du cycle Milpa, se trouvant à intervalles de 3 mètres dans les zones où cette phase est présente. L'annexe 10 donne une estimation du nombre de feuilles par hectare basée sur cette information.

III.2 Paramètres pris en compte dans le calcul : triade dimensionnelle

III.2.1 Distinction entre PRU, SRU et SRS

Il a été précisé précédemment que plus de 50% des éléments archéologiques composites du site archéologique d'El Pilar étaient des monticules. En outre, ces derniers se divisent en trois types.

Les PRU, comme les SRU, sont appelées « unités résidentielles » et sont des architectures non monumentales. Cette classification a été créée « en évaluant plusieurs critères : les dimensions de la structure (longueur diagonale et hauteur), le nombre de structures dans un groupe, la présence d'une place (plateforme surélevée) et les valeurs d'investissement en main-d'œuvre (« *Labor Investment* ») (Ford et Clarke 2016). » (Ford & Tran, 2023).

III.2.1.1 Unité résidentielle principale (ou « *Primary Residential Unit* » - PRU)

Les PRU sont des unités structurelles autonomes mayas. Constituées d'un ou plusieurs bâtiments à usages variés, elles constituent les quartiers résidentiels des Mayas. Les PRU « sont définies comme des groupes de ménages comprenant souvent au moins deux structures selon les dynamiques traditionnelles des ménages agricoles (Everton 2012:58 ; Hanks 1990:95-96 ; 333). » (Ford & Tran, 2023).

III.2.1.2 Unité résidentielle secondaire (ou « *Secondary Residential Unit* » - SRU)

Les SRU « représentent des résidences secondaires qui ont peut-être servi de structures auxiliaires et de stockage agricole dans les zones périphériques (Zetina Gutiérrez 2007). ». Ces unités sont généralement de petite taille et sont situées à distance des PRU.

Personne ne vit à temps plein dans les SRU, ils « ne sont pas inclus dans la population. » (Ford & Tran, 2023).

III.2.1.3 Structure de portée solitaire (ou « *Solitary Range Structure* » - SRS)

Les SRS peuvent être définies comme « une structure unique et imposante, constituée d'une élévation importante résultant d'un investissement en main-d'œuvre conséquent. Sa diagonale est supérieure ou égale à 9 mètres et ses structures sont élevées (d'une hauteur d'un mètre ou plus) » (information transmise par Sherman Horn III).

Ces définitions et distinctions sont partiellement vérifiées et confirmées à travers des analyses statistiques approfondies visant à affiner les paramètres considérés dans le calcul final.⁷

III.2.2 Processus de classification des monticules individuels

Après avoir quantifié les matériaux disponibles pour la construction des abris des anciens Mayas, il était essentiel de déterminer les besoins requis pour mener à bien ce processus. L'approche consistait à classer les monticules individuellement afin de leur attribuer un poids cohérent dans le calcul final des ressources requises.

La géodatabase d'El Pilar comprend deux couches géospatiales pertinentes pour cette démarche. La première, appelée « Individual Features », est une couche de points qui contient des informations sur toutes les structures individuelles identifiées, parmi lesquelles certaines peuvent faire partie d'un groupe architectural plus important, comme le montre la couche « Unified Architecture ».

Cela explique la différence notable dans le nombre de monticules entre ces deux couches :

- ❖ Parmi les 2339 monticules de la couche « Individual Features », 1736 étaient des PRU, 484 étaient des SRU et 109 étaient des SRS.
- ❖ Quant aux 1229 monticules de la couche « Unified Architecture », 717 étaient des PRU, 405 étaient des SRU et 107 étaient des SRS.

Cette dernière est une couche de polygones qui rassemble des données sur l'ensemble des éléments architecturaux et des structures identifiées à El Pilar.

Pour isoler les monticules individuels, on effectue une sélection attributaire de la couche « Individual Features » basée sur les deux derniers chiffres du champ « Datum_ID ». Si ce nombre se situe entre 1 et 19 inclus, alors il s'agit d'un monticule. Via ce procédé, 2339 entités sur 4654 sont sélectionnées, ce qui signifie que plus de 50% des caractéristiques architecturales sont des monticules, conformément à la section **III.2.1**.

Afin de transformer la couche de points « Monticules individuels » en couche de polygones, les données associées de la couche « Unified Architecture » sont utilisées et converties de polygones en polygones.

⁷ Annexe 13

Ensuite, une jointure spatiale entre la nouvelle couche de polygones et la couche « Monticules individuels » est effectuée en utilisant l'« IF_ID » le plus proche dans un rayon de 5 mètres.

L'« IF_ID » est le numéro après l'identificateur principal du « Datum_ID ». Il indique s'il s'agit d'une partie d'un ensemble plus grand (par exemple, un seul monticule parmi un groupe de trois monticules s'appellera 01.1, le monticule suivant sera 01.2, puis 01.3). Cette jointure permet à chaque polygone de recevoir un attribut « IF_ID », qui indique s'il fait partie d'un ensemble plus grand.

Enfin, l'outil « Fusionner » est utilisé pour joindre tous les polygones ayant des « IF_ID » correspondants, créant ainsi une couche de polygones regroupant tous les monticules individuels avec des « IF_ID » correspondants. L'ensemble de ce processus a été conduit via ArcGIS Pro et est illustré via la figure 13.

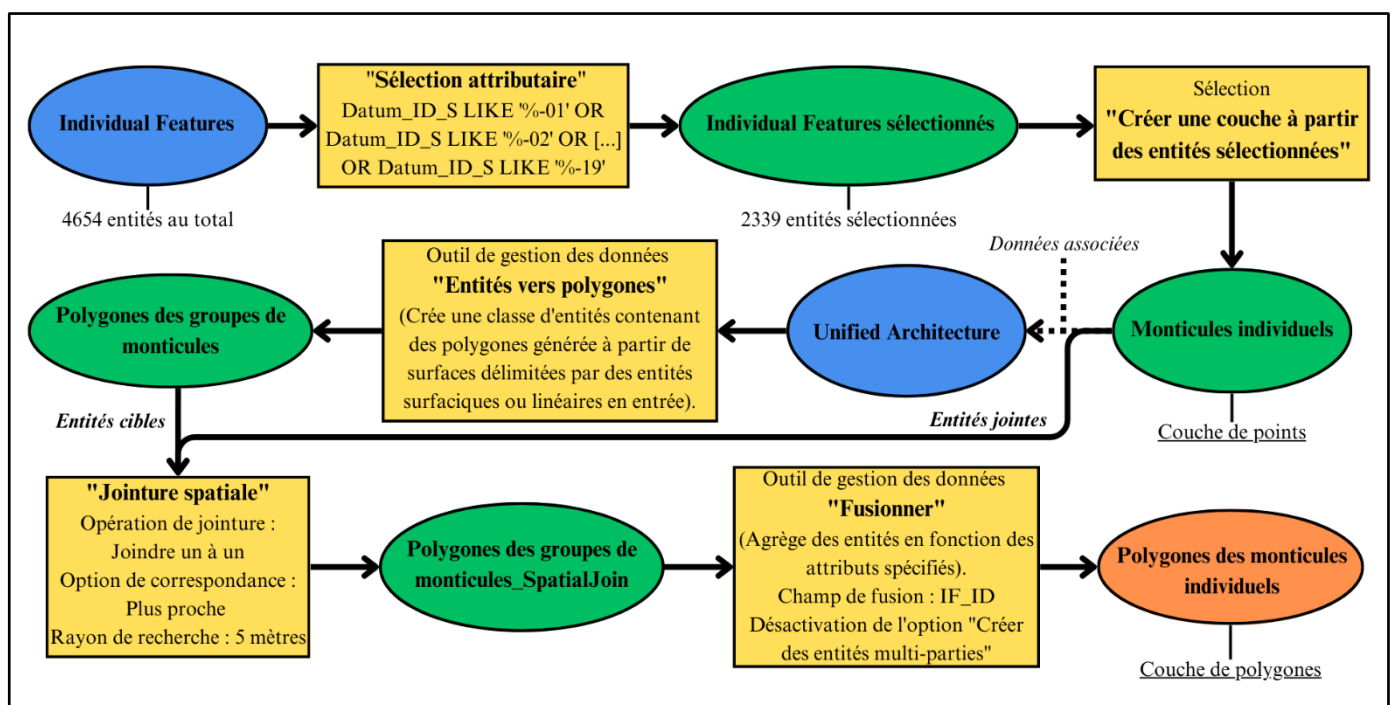


Figure 13 – Processus de création de la couche de polygones des monticules individuels à des fins statistiques

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

À l'issue de la création de la couche de polygones des monticules individuels, il s'avérerait nécessaire d'incorporer au sein de sa table attributaire les champs jouant un rôle clé dans le poids inhérent au calcul final. Cela s'est traduit par plusieurs étapes, exposées via la figure 14.

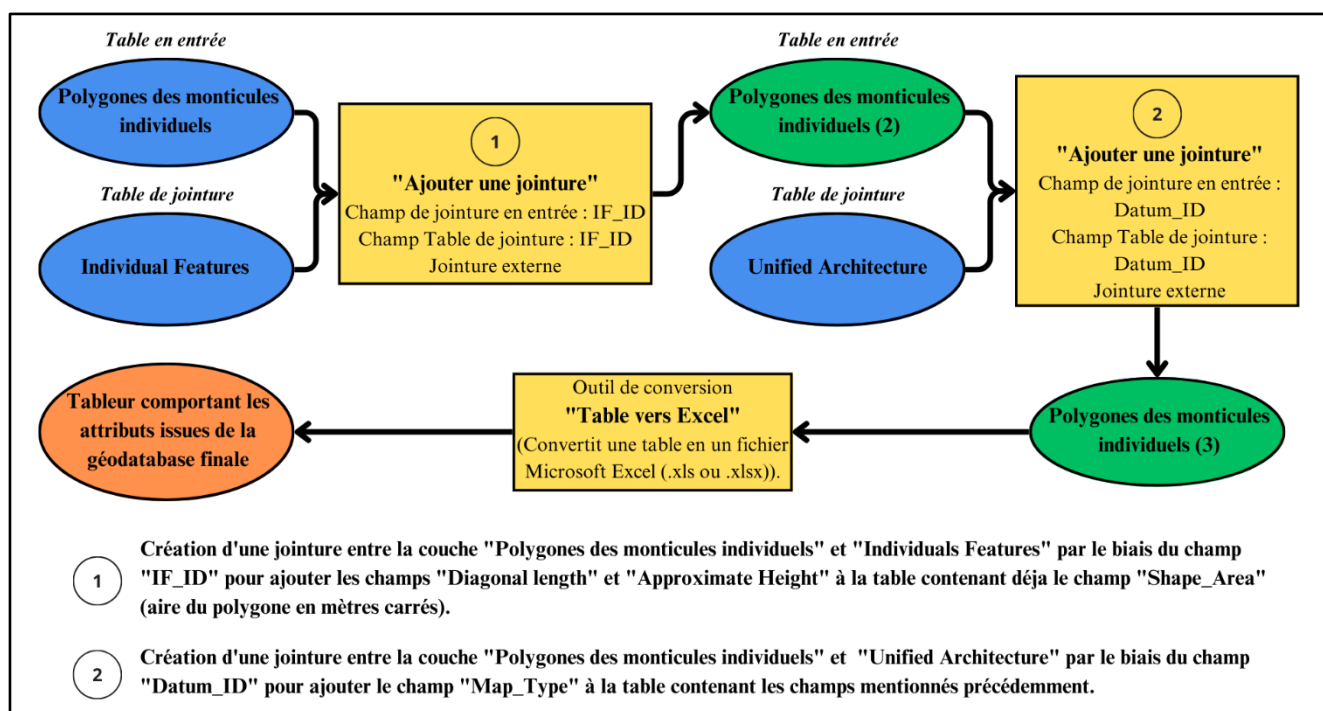


Figure 14 – Processus de création du tableur incluant l'ajout des champs nécessaires à la classification des monticules

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Initialement, les critères retenus étaient la longueur diagonale, la hauteur approximative, la surface ainsi que le type de structure (PRU, SRU ou SRS) du monticule. Cependant, étant donné la corrélation observée entre la surface et la longueur de la diagonale, il a été décidé de n'utiliser que cette dernière comme critère, principalement en raison de sa facilité de classification des monticules.⁸

En utilisant le tableur obtenu après les manipulations décrites en amont, une classification spécifique a été établie. La hauteur approximative de chaque structure par rapport à la longueur de la diagonale a été prise en considération. En outre, une répartition du type de structure des monticules a été ajoutée pour chaque classe.⁹

D'après les observations et les travaux du docteur Anabel Ford sur le terrain, les monticules ont initialement été classés en trois catégories en fonction de leur hauteur approximative :

- ❖ Les monticules mesurant entre 0 et 0,99 mètres étaient d'anciennes unités structurales construites exclusivement à partir de composants périssables. Tous les éléments structurants étaient donc nécessaires.

⁸ Annexe 10

⁹ Annexe 11

- ❖ Les monticules mesurant entre 1 et 1,99 mètres étaient également d'anciennes unités structurelles construites majoritairement à partir de composants périssables. Tous les éléments structurants étaient nécessaires. Dans ce cas spécifique, un arbre aurait pu équivaloir à deux poutres car les monticules contiennent des restes de murs en pierre qui servaient de fondations pour élever les poteaux des constructions. Toutefois, il a été appris tardivement que tous les poteaux structurels, c'est-à-dire ceux soutenant l'ensemble du cadre, doivent être ancrés dans le sol. Il était donc logique que les deux premières catégories soient fusionnées.
- ❖ Enfin, les monticules dont la hauteur dépasse 2 mètres ne sont pas pris en compte dans le processus de quantification. Cela est dû au fait que les structures de ces monticules, y compris les murs et la toiture, étaient intégralement en pierre.

III.2.3 Longueur diagonale des monticules : Facteur clé pour quantifier les matériaux sur une base annuelle

Subséquentement, les monticules ont été répartis en trois classes en fonction de la longueur de leur diagonale. La première classe correspondait à une valeur comprise entre 3 et 6 mètres, la deuxième entre 7 et 11 mètres, et la dernière entre 12 et 25 mètres. Elles ont été déterminées en se basant sur la distribution de cette variable.¹⁰ Un tableau résultant alors du croisement des données issues de ces deux classifications a alors été établi, tout en prenant en compte la répartition des PRU, SRU et SRS.¹¹

Avant de procéder, il a été convenu que la quantification serait déterminée pour des besoins annuels en matériaux de construction, afin que les chiffres soient plus parlants. Sur les 2339 monticules répertoriés, 1925 ont été inclus dans le calcul. Cela est dû au fait que 414 de ces monticules ont une hauteur approximative de plus de 2 mètres. Étant donné que ces structures étaient constituées de murs et de toits en pierre, elles ont été exclues de la quantification. En divisant le nombre total de monticules (1925) par la durée de vie moyenne d'une habitation Maya (40 ans), on obtenait une moyenne de 49 maisons mayas construites par an.

¹⁰ Annexe 12

¹¹ Annexe 13

Parmi les 1925 monticules, leur répartition en fonction de la longueur diagonale se divisait comme suit :

- ❖ 1002 monticules avaient une longueur diagonale comprise entre 3 et 6 mètres (catégorie « petite »).
- ❖ 733 monticules avaient une longueur diagonale comprise entre 7 et 11 mètres (catégorie « moyenne »).
- ❖ 190 monticules avaient une longueur diagonale comprise entre 12 et 22 mètres (catégorie « large »).

En pourcentage, cela se traduisait respectivement par 52 % pour la catégorie « petite », 38 % pour la catégorie « moyenne » et 10 % pour la catégorie « large ». En multipliant le nombre de maisons présumées construites chaque année par les facteurs découlant de ces pourcentages (0,52, 0,38 et 0,10), on obtient la répartition des 49 structures annuelles selon ces trois catégories. En d'autres termes, il y avait 25 structures issues de la catégorie « petite », 19 de la catégorie « moyenne » et 5 de la catégorie « large ».

En tenant compte de la répartition des PRU, SRU et SRS au sein de chaque catégorie, il suffisait d'appliquer simplement les pourcentages spécifiques à chaque type de structure pour obtenir la répartition attendue des types de structures annuelles par catégorie :

- ❖ Au sein de la catégorie « petite », 16 des structures étaient des PRU et 9 des SRU.
- ❖ Au sein de la catégorie « moyenne », 15 des structures étaient des PRU, 3 des SRU et 1 était un SRS.
- ❖ Enfin, au sein de la catégorie « large », 4 des structures étaient des PRU et 1 était un SRS.

Sur une base annuelle, il y aurait donc eu **35 PRU**, **12 SRU** et **2 SRS** construits en suivant une répartition proportionnelle. La quantification a été effectuée en admettant que cette hypothèse était véridique. Par conséquent, il ne restait plus qu'à quantifier avec précision les quatre composants principaux structurels des abris, en tenant compte des trois classes de longueur de la diagonale des monticules. Cette quantification comporte deux parties. La première a permis de répondre à la question « Combien ? ». La seconde, qui s'intéressait à la répartition des matériaux nécessaires selon le type de croissance forestière des espèces végétales concernées, afin de proposer une quantification par unité surfacique (par kilomètre carré et hectare), a permis de répondre à la question « Où ? ».

III.3 Résultats de la quantification et analyse de l'hypothèse formulée

Les deux parties couvrant l'ensemble des calculs du processus de quantification sont détaillées et consultables par le biais de l'annexe 15.

III.3.1 Nombre d'éléments structurants requis pour la construction des abris des anciens Mayas

Après avoir achevé la première phase de quantification, les besoins en termes de composants (donc d'arbres) requis ont été synthétisés dans le tableau 4. Il est important de rappeler que ces valeurs sont valables pour une base de 49 structures par an, sur une période de 40 ans, dans le cas d'une distribution proportionnée des PRU, SRU et SRS. À noter que le total de feuilles prend en compte leur durée de vie de 20 ans en tant que revêtement de toiture, nécessitant un remplacement complet du couvert à l'échéance.

Composants	Poteaux	Poutres	Chevrons	Feuilles
Nombre requis sur une base annuelle	598	1 011	1 001	304 541
Total pour l'ensemble des 1925 monticules sur 40 ans	23 920	40 440	40 036	24 363 248

Tableau 4 – Besoins en matériaux liés au processus de construction des abris des anciens Mayas sur une base annuelle

Source : Personnelle

III.3.2 Nombre d'éléments structurants requis selon le type de croissance forestière des arbres / Quantification par unité de surface

Il est essentiel de considérer que les 54 espèces végétales ne sont pas viables pour la construction pendant les mêmes étapes du cycle Milpa, la phase de croissance varie en fonction de l'élément structurel souhaité. D'après les « Maya Forest Gardeners », les arbres à vocation de poteaux nécessitent environ vingt ans de croissance, tandis que ce temps est réduit de moitié pour les poutres et les chevrons. Comme mentionné dans la section III.1.2, une espèce végétale peut appartenir à deux, voire à l'ensemble des catégories d'éléments structurels. C'est pourquoi le même arbre peut être viable dans deux cycles différents du Milpa (secondaire et mature, par exemple). À partir de ce postulat, il est donc normal que le nombre requis d'éléments structurels par unité surfacique varie en fonction du type de croissance forestière.

Les chiffres provenant du tableau 5 sont directement corrélés au nombre d'espèces végétales viables dans le processus de construction pour chacune des étapes du cycle Milpa (recensées dans le tableau 13 de l'annexe 15).

Composants	Nombre requis par kilomètre carré en fonction du type de croissance forestière	Nombre requis par hectare en fonction du type de croissance forestière
Poteaux	21 / 81 / 12	0,12 / 0,81 / 0,12
Poutres	85 / 108	0,85 / 1,08
Chevrons	67 / 124	0,67 / 1,24
Feuilles	[57678, 115356]	[576,8, 1153,6]

Tableau 5 – Nombre d'éléments structurels requis par unité de surface selon le type de croissance forestière

Source : Personnelle

Les différentes phases du cycle Milpa, à savoir les cycles **secondaire**, **mature** et **forestier**, comportaient chacune des espèces végétales qui étaient utilisées comme poteaux dans les constructions. Cependant, seules les deux premières phases disposaient d'espèces végétales pouvant servir de poutres et de chevrons dans le processus de construction.

De plus, seule la phase mature offrait des feuilles de palmiers de *Sabal Mauritiiformis* qui convenaient pour la fabrication des toitures, comme mentionné dans la section **III.1.3**. Néanmoins, il demeurerait difficile d'établir avec précision le pourcentage exact de la surface associée au type de croissance forestière qui possède les feuilles de palmiers de *Sabal Mauritiiformis* appropriées. Par conséquent, il a été hypothétisé qu'une plage viable se situerait entre **50 %** et **100 %** de cette surface. Cela a permis de déterminer les besoins par unité de surface de feuilles de Guano nécessaires.

III.3.3 Validation ou rejet : Verdict numérique

En introduction, le questionnaire portait tout d'abord sur la faisabilité d'estimer les coûts de construction de logements en termes de matériaux. À la suite de la quantification réalisée sur une base annuelle, il semblerait, compte tenu de la cohérence et de la tangibilité des résultats obtenus, ainsi qu'après des discussions avec le docteur Anabel Ford et les « Maya Forest Gardeners », que cette hypothèse puisse être affirmativement résolue.

Toutefois, il s'avère difficile de statuer si les ressources naturelles, comme les arbres pérennes, sont en quantité suffisante pour répondre aux besoins des abris. Les chiffres issus de la quantification des matériaux disponibles, exposés par le biais du tableau 14 de l'annexe 16, sont en réalité assez peu significatifs. Cela est en majeure partie dû à la façon dont ces données sont recensées : un recensement de type présence / absence.

Néanmoins, il est possible d'extrapoler les données à disposition. En se basant sur les informations fournies par les « Maya Forest Gardeners » mentionnées dans la section **III.3.2**, il est possible de parvenir à des simulations tendant à affirmer cette hypothèse pour un cycle annuel, mais à la réfuter pour une période prolongée, autrement dit sur un cycle annuel de plusieurs années. Ces résultats sont regroupés au sein de l'annexe 16.

III.3.4 Paramètres majeurs influents et/ou omis dans les calculs et impacts potentiels

Pour appréhender et plus tard potentiellement optimiser ces résultats, il est crucial d'énumérer les paramètres exerçant une influence, à une échelle variable, sur les quantifications.

Tout d'abord, il est important de rappeler que la forêt, dans son état actuel, diffère radicalement de la période post-classique (900-1519 après J.-C.), pendant laquelle prospéraient les anciens Mayas. Aujourd'hui, elle se trouve dans un état plus sauvage et moins cultivée mais surtout exclue du cycle asynchrone de 20 ans du cycle Milpa. Si ce dernier peut être défini comme une « solution climatique » de nos jours, c'est en raison de ses nombreux bienfaits : réduction des températures et de l'érosion, augmentation de la fertilité des sols, préservation de l'eau et accroissement de la biodiversité, entre autres.

La forêt tropicale abritant le site archéologique d'El Pilar est un lieu qui illustre un modèle de succession écologique secondaire. C'est un environnement colonisé par les anciens Mayas il y a 6 siècles, qui a subi de nombreuses perturbations majeures, comme des incendies et des ouragans, mais qui n'a pas été complètement détruit. Bien que le sol et certaines parties de la communauté biologique et végétale précédente ont subsisté, cela a eu un impact considérable, et difficilement quantifiable, sur les espèces végétales répertoriées durant le processus de recensement. La nature ayant repris ses droits, il n'y a donc plus de succession des différents cycles composant ce dernier, ce qui explique aussi pourquoi il est impertinent de réaliser une quantification des matériaux disponibles par unité de surface.

Le recensement n'est pas dénué de possibles inexactitudes. Les « Maya Forest Gardeners » peuvent confondre une espèce végétale avec une autre, ou bien prendre en considération des arbres qui se trouvent à un stade précoce de leur phase de croissance, ce qui les exclurait d'emblée de leur rôle potentiel dans le processus de construction des abris. Bien qu'il s'agisse d'un répertoire exhaustif plutôt que quantitatif, la couverture spatiale des données de végétation reste relativement limitée, comme exposé dans la section **II.3.1**.

Lors du processus de classification des monticules, les trois classes de longueur diagonale caractérisant ces derniers ont été créées en se basant purement sur une impression, une perception de ce qui est petit, moyen et large à l'échelle constructible. Il est certain que si les intervalles de valeurs définissant ces classes venaient à être modifiés, cela pourrait avoir un impact plus ou moins significatif sur la quantification générale.

Dans le cadre de l'analyse quantitative des impératifs en matériaux, une simplification a été opérée en se basant sur une hypothèse de répartition proportionnelle entre les PRU, SRU et SRS. Il est important de souligner que cette hypothèse a été adoptée à des fins de calcul et de simplification. Toutefois, il convient de noter qu'elle repose sur une présomption théorique plutôt que sur une preuve matérielle concrète. Il aurait également été envisageable que, sur une période donnée, seuls des PRU soient construits, ou que les besoins en construction répondent exclusivement aux exigences des Mayas à un moment précis, sans nécessairement obéir à une logique de proportionnalité. Néanmoins, ces inexactitudes potentielles s'estompent lorsque l'on considère le total des besoins en matériaux pour l'ensemble des 1925 monticules sur 40 ans.

Les chiffres concernant le nombre d'éléments structurels requis par unité de surface, en fonction du type de croissance forestière, sont établis en supposant que la croissance des espèces végétales est uniforme. Cela signifie que la présence de chaque espèce sur un territoire est considérée comme équivalente pour toutes les espèces. Cependant, malgré les compétences en domestication végétale des anciens Mayas, il est peu probable qu'ils aient pu répartir de manière égale les espèces utiles dans leurs processus de construction. D'office, cela biaise les valeurs estimées.

Conclusion

Initialement, l'objectif de ce travail de fin d'étude était d'évaluer les dépenses liées à la construction des anciens abris Mayas en considérant les matériaux utilisés. Pour cela, il a fallu mener à terme un recensement exhaustif mais non quantitatif des espèces végétales, commencé en 2014 à la suite de l'acquisition LiDAR, au sein de la réserve archéologique d'El Pilar. Ce répertoire ne se faisait qu'aux endroits où la présence de monticules était confirmée in-situ, car il est supposé que les anciens Mayas utilisaient les matériaux et les ressources à leur disposition à proximité de leurs futurs lieux d'habitation, qui aujourd'hui subsistent sous forme de monticules.

Afin de localiser les emplacements des potentiels monticules, et donc de lieux de recensement de la végétation, un raster dérivé de la technologie LiDAR, la « Bone Map » était employé pour superviser les expéditions sur le terrain. Bien que cette technologie ne constitue pas une solution miracle pour détecter et répertorier ces sites, elle facilite notablement la phase de recensement en indiquant de manière relativement précise les emplacements à explorer. Combinée à l'utilisation de GPS, elle a permis que 2023 soit l'année clôturant l'acquisition des données en lien avec la végétation. En concaténant les données des différentes années d'acquisition, et via une intégration dans la géodatabase d'El Pilar par le biais d'ArcGIS Pro, il a été possible de créer une couche de points géolocalisant les sites au sein desquels la végétation a été recensée et les espèces présentes.

À l'avenir, ce produit pourra être mis en relation avec d'autres données composant la géodatabase d'El Pilar. Par exemple, avec les différents types de sol, qui ont fait l'objet d'une étude approfondie par le biais du mémoire de ma camarade Enora Tanguy (2023). Un croisement de données, entre les sites où l'inventaire végétal a été effectué, recensant les espèces présentes, et les différents sols de la réserve archéologique d'El Pilar permettrait de mieux comprendre la répartition de certaines espèces végétales, voire de déceler un schéma de modèle de succession écologique plus complexe.

Bien que ces valeurs ne paraissent pas aberrantes en soit, les chiffres découlant du processus de quantification ont été déterminés sur une base annuelle, en hypothétisant une distribution proportionnelle des PRU, SRU et SRS. Cependant, les erreurs pouvant en résulter sont atténuées lorsque l'on considère le total des coûts de construction de logements en termes de matériaux sur 40 ans.

En analysant les étapes nécessaires pour parvenir à sa réalisation, il s'agit d'abord de créer une couche répertoriant les 2339 monticules individuels. Cette première étape conduit ensuite à une classification croisée basée sur la hauteur approximative et la longueur diagonale des monticules. Cette classification est combinée avec la décomposition en quatre éléments structurels du modèle d'habitation servant de base aux calculs, qui à son tour permet de calculer les besoins en matériaux pour chaque catégorie de composant. Il est important de noter que l'ensemble de ce processus est essentiellement expérimental et présente un caractère relativement théorique.

Dans un contexte différent, J. Robert Oppenheimer disait : *“theory will only take you so far”* (« la théorie vous mènera seulement jusqu'à un certain point »). Ce que les mathématiques indiquent sur papier ne peuvent pas toujours prédire ce qui se produira (ou s'est produit) dans la vie réelle. Il serait donc pertinent, à l'aide des « Maya Forest Gardeners », de construire un modèle d'habitation à l'échelle, afin de voir si la simplification en quatre éléments structurels se veut réaliste, et si les besoins en matériaux pour chaque catégorie de composant relèvent plus de l'approximation ou non.

Il en va de même pour le second objectif de ce travail, à savoir évaluer si les ressources naturelles, notamment les arbres pérennes, sont en quantité adéquate pour satisfaire les besoins en habitats. Bien que cela demanderait des moyens humains et techniques de grande ampleur, il serait intéressant de pouvoir réaliser un inventaire quantitatif des espèces végétales se trouvant au sein de la réserve archéologique d'El Pilar.

À travers cette approche novatrice qui explore la végétation au sein d'un site archéologique, mon objectif était également de démontrer la possibilité de déceler des liens entre deux domaines en apparence distincts mais en réalité proches par leur caractère conservateur : l'archéologie et l'écologie. C'est pourquoi je soutiens vivement l'émergence d'approches similaires au sein d'autres sites où la végétation risque d'être négligée au profit de l'archéologie. Ces deux domaines peuvent collaborer de manière synergique, apportant mutuellement bénéfices et enrichissements.

Ce stage s'est révélé être une expérience intense et profondément enrichissante sur les plans intellectuel et culturel. Parallèlement, j'espère que ce travail de recherche contribuera à établir une vérité générale concernant les accusations de dévastation environnementale portées contre les anciens Mayas.

Bibliographie

BRENNER M., ROSENMEIER M., HODELL D., CURTIS J. *PALEOLIMNOLOGY OF THE MAYA LOWLANDS : Long-term perspectives on interactions among climate, environment, and humans*. Ancient Mesoamerica, 2002, vol. 13, n°1, pp. 141-157.

CHASE A., CHASE D. *Detection of Maya Ruins by LiDAR: Applications, Case Study, and Issues*. In : SOLDOVIERI F., MASINI N., Sensing the Past: From artifact to historical site. Cham, Suisse : Springer, 2017, 593 p.

CHASE A., CHASE D., FISHER C et al. *Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology*. Proceedings of the National Academy of Sciences, [en ligne], 2012, vol. 109, n°32. Disponible sur : <https://doi.org/10.1073/pnas.1205198109> (consulté le 05/04/2023).

CLARKE K., FORD A., PINGEL T. *Bonemapping: A LiDAR Processing and Visualization Technique in Support of Archaeology Under the Canopy*. Cartography and Geographic Information Science, [en ligne], 2015, vol. 42, supplément n°1. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1059171> (consulté le 27/03/2023).

COOK D., BEACH T., LUZZADDER-BEACH S et al. *Environmental legacy of pre-Columbian Maya mercury*. Frontiers in Environmental Science | Sec Toxicology, Pollution and the Environment, [en ligne], 2022, vol. 10. Disponible sur : <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.986119> (consulté le 03/04/2023).

FEDICK S., *An Agricultural Perspective on Prehistoric Maya Household Location and Settlement Density*. In : Primer Congreso Internacional de Mayistas. Instituto de Investigaciones Filológicas; Centro de Estudios Mayas. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 1992, pp. 87-108.

FEDICK S., *Land Evaluation and Ancient Maya Land Use in the Upper Belize River Area, Belize, Central America*. In : Latin American Antiquity [en ligne], 1995, vol. 6, n°1, pp. 16-34. Disponible sur : <https://doi.org/10.2307/971598> (consulté le 20/07/2023).

FORD A. *Dominant Plants Of The Maya Forest And Gardens Of El Pilar: Implications For Paleoenvironmental Reconstructions*. Journal of Ethnobiology, [en ligne], 2008, vol.

28, n°2. Disponible sur : <https://doi.org/10.2993/0278-0771-28.2.179> (consulté le 06/03/2023).

FORD A., HORN III S. *Lidar at El Pilar : Understanding Vegetation Above and Discovering the Ground Features Below in the Maya Forest*. In : TORRESCANO-VALLE N., ISLEBE G., ROY P., *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico*. Departamento Conservación de la Biodiversidad, El Colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal, Chetumal, México : Nuria Torrescano-Valle, 2019, 280 p.

FORD A., TRAN J. *ADAPTING THE FOREST: A SPATIAL MODEL OF SUSTAINABLE MAYA PRODUCTION AT EL PILAR*. Article à paraître.

LARDILLEUX J. *Mise en place d'un protocole pour découvrir l'architecture des anciens sites Maya basé sur les images LiDAR : modèles d'utilisation du paysage dans la forêt Maya*. Mémoire de Master, Le Mans (France) : École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2014, 76 p.

LOCK G., STANCIC Z. (Eds.). *Archaeology and geographic information systems: A European perspective*. Londres, Angleterre : Taylor & Francis, 1995, 392p.

MORDANT G. *Seuils de détection des anciens sites de l'architecture Maya basés sur l'imagerie LiDAR : identification des sites sous la canopée*. Mémoire de Master, Le Mans (France) : École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2014, 94 p.

PINGEL T., CLARKE K. *Perceptually Shaded Slope Maps for the Visualization of Digital Surface Models*. Cartographica The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, [en ligne], 2014, vol. 49, n°4, pp. 225-240. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.3138/carto.49.4.2141> (consulté le 18/07/2023).

PINGEL T., CLARKE K., MCBRIDE W. *An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, [en ligne], 2013, vol. 77, n°1, pp. 21-30. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002> (consulté le 18/07/2023).

SUÁREZ A. *La construcción simbólica y material de la casa maya*. In : EASTMOND A., QUINTANILLA A., SUÁREZ A., Xa'anil naj *LA GRAN CASA DE LOS MAYAS*.

Mérida, Yucatán, México : Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2017, 328p.

TANGUY. E. *Analysis of land use by Maya civilization: Settlements patterns at El Pilar archeological site*. Master thesis, Le Mans (France) : École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2023, 78p.

TAYLOR R., FRANCIS W. (Eds.). *Current and potential uses of geographic information systems: the North American experience*. In : PEUQUET J., MARBLE F, Introductory Readings In Geographic Information Systems. New York, États-Unis : Taylor & Francis, 1990, 382 p.

The Milpa Cycle. In : MAYA FOREST GARDENERS. “What are Maya Forest Gardeners?”, [en ligne]. Disponible sur : <https://mayaforestgardeners.org/farming/milpa-cycle/> (consulté le 15/04/2023).

Who we are. In : MAYA FOREST GARDENERS. “What are Maya Forest Gardeners?”, [en ligne]. Disponible sur : <https://mayaforestgardeners.org/who-we-are/> (consulté le 10/05/2023).

Table des annexes

Annexe 1 Caractéristiques techniques de l'acquisition LiDAR à El Pilar	50
Annexe 2 Présentation de la géodatabase d'El Pilar	51
Annexe 3 Diagramme UML de la géodatabase d'El Pilar	55
Annexe 4 Le cycle Milpa	56
Annexe 5 Formulaire de recensement de la végétation.....	57
Annexe 6 Extrait du tableur recensant les données de végétation.....	58
Annexe 7 Modélisation du cycle Milpa par le biais d'ArcGIS Pro.....	59
Annexe 8 Cartes de répartition des arbres de copal au sein d'El Pilar	60
Annexe 9 Optimisation de la construction : Conception simplifiée de l'habitat des anciens Mayas	61
Annexe 10 Détail du calcul estimant le nombre de feuilles de <i>Sabal Mauritiiformis</i> par hectare au sein d'El Pilar	64
Annexe 11 Corrélation entre la longueur de la diagonale et la surface des monticules	65
Annexe 12 Extrait du tableur comprenant les champs utilisés pour la classification des monticules	66
Annexe 13 Histogrammes de la distribution de la longueur de la diagonale des monticules	67
Annexe 14 Tableaux de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules (avant et après fusion des deux premières catégories).....	68
Annexe 15 Détail du processus de quantification des coûts de construction de logement en termes de matériaux	69
Annexe 16 Extrapolation des données issues de la quantification des matériaux disponibles en fonction de leur vocation dans le processus de construction	76

Annexe 1

Caractéristiques techniques de l'acquisition LiDAR à El Pilar

LiDAR Project Summary									
		Airborne Imaging 5757 4th Street SE Calgary, Alberta, Canada T2H 1K8			Telephone: (403) 215 2960 Fax: (403) 243 8681 www.airborneimaginginc.com				
Project Information									
Project Name:		El Pilar							
Project Number:		3089							
Client:		University of California (Santa Barbara)							
Project Type:		Local Area							
Project Location:		El Pilar, Guatemala							
Project Size:		22 sq kms							
Acquisition Projects									
Project Name				Project Number			Vintage		
El Pilar				3089			April 2012		
Acquisition Parameters									
Date (MM/DD/YY)	Mission	Flying Height (m)	Flying Speed (knots)	Pulse Rate Rep (kHz)	Scan Freq (Hz)	Scan Angle (degree)	Side Lap %	Point Density (pts/m ²)	LiDAR System
4/19/2012	0312110a	330	80	120	40	50	50	19	Leica ALS50
4/19/2012	0312110b	330	80	120	40	50	50	19	Leica ALS50
Multiple Return Capabilities:				YES		Number of returns recorded:			Maximum 4
Geodetic Control									
Horizontal Datum:		Nad83 (CORS96, epoch 2002)			OPUS Solution				
Geoid Model:		EGM96			UTM Zone:		16		
Note: We established a local geodetic network fixed to the following control:									
Station ID		Lat			Long			Ellp Height	
Yaloch		N17 18 42.64145			W89 10 21.60536			151.583	
Calibration Methodology									
Airborne Imaging performs a complete calibration on every LiDAR acquisition flight, data is acquired over a calibration site flown with at least two passes in opposite directions before and after the flight. Any error in the attitude of the aircraft (roll, pitch and heading) can be observed and corrected for within system specifications.									
Accuracy									
Horizontal Accuracy, 95% or 2σ:								45 cm	
Fundamental Vertical Accuracy (on flat hard surfaces), 95% or 2σ:								30 cm	

Figure 15 – Résumé de l'acquisition LiDAR sur le site d'El Pilar

Source : Airborne Imaging

Annexe 2

Présentation de la géodatabase d'El Pilar

La géodatabase d'El Pilar rassemble la plupart des données SIG associées à El Pilar et aux structures du site. Le tableau 6 recense les principales couches utilisées.

Nom de la couche	Type de formes	Description
Unified Architecture (UA)	Polylignes	Contient des données sur tous les éléments architecturaux ainsi que les structures identifiées à El Pilar.
Individual Features (IF)	Points	Contient des données sur les structures individuelles identifiées à El Pilar.
Group Association (GA)	Points	Détaille les regroupements d'éléments architecturaux en fonction de la proximité, de la topographie et de l'orientation.
GoTo_Concordance (GoTo's)	Points	Détaille les emplacements des sites archéologiques potentiels à El Pilar.

Tableau 6 – Principales couches de données issues la géodatabase d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center

Dans la géodatabase d'El Pilar, les données composant ces couches sont liées les unes aux autres par des relations simples et composites, qui sont détaillées dans le diagramme UML (Annexe n°3). Au sein de celle-ci, il existe cinq fichiers principaux, qui correspondent à des shapefiles : « UA » (avec la date de la dernière mise à jour), « IF » (avec la date de la dernière mise à jour), « GA » (avec la date de la dernière mise à jour), et « GoTo_Concordance ».

La géodatabase « WEP23F_May24th2023_GDB.gdb » est datée du 23 mai 2023, tandis que la couche « UA » aborde la nomenclature suivante : « UA17032023GDB », étant donné le fait que les dernières modifications y ont été réalisées le 17 Mars 2023.

Ci-dessous, en se référant à la figure 16, on retrouve une place comprenant trois monticules (similaires à un grain de café). L'unique « Unified Architecture » englobe à la fois la place et les trois monticules, tandis que les quatre « Individual Features » représentent l'ensemble de ces éléments archéologiques. Chaque point rouge est une « IF », disposant de sa propre polyligne liée à la couche « UA » permettant d'indiquer visuellement de quel type de structure il s'agit. Les couches « UA » et « GA » peuvent être distinguées l'une de l'autre en fonction des critères de regroupement utilisés.

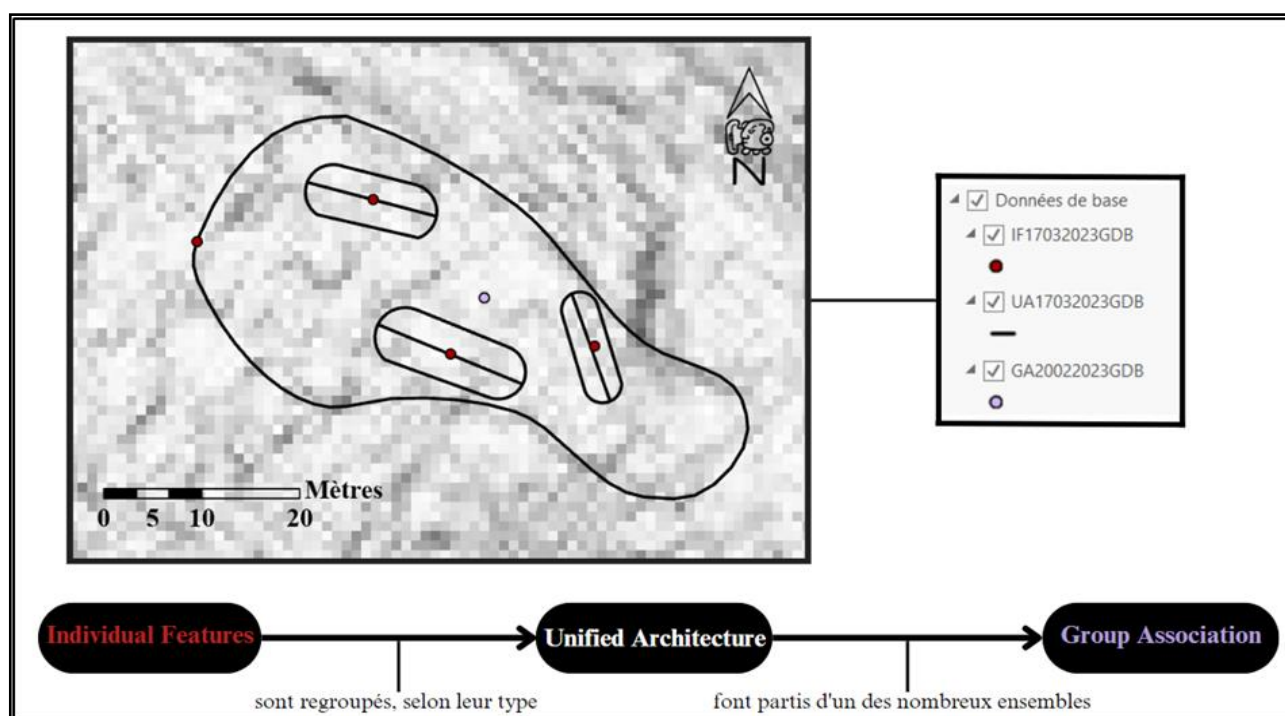


Figure 16 - Carte de distribution spatiale du volume de données en lien avec la végétation au sein d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center - Données de la géodatabase du 22/06/2023

Note : Si l'attribut n'est pas répertorié dans les tables suivantes, il est considéré comme non utilisé ou secondaire.

Unified Architecture (UA) : L'architecture et les caractéristiques à El Pilar sont communément divisées en groupes, en fonction de la proximité des structures les unes par rapport aux autres.

En premier lieu, on reconnaît les monticules, ou les restes de maisons. Ces groupes sont appelés « Unités résidentielles ». En second lieu, sont distinguables les groupes qui se forment en raison des modifications du sol telles que les terrasses, les carrières ou les talus. Ils sont sobrement appelés « Groupes de modifications du sol ».

Bien que certaines de ces unités soient représentables par des polygones, ce postulat n'est pas applicable pour tous les types d'architectures. Les terrasses ou les bermes par exemple, sont représentées par des « lignes brisées », difficilement modélisables par le biais de polygones.

Champ	Description
GIS_Name	Le nom original du point GoTo utilisé pour découvrir la caractéristique, avant que le groupe ne soit renommé avec un Datum_ID. Il y a une relation simple de type « un à plusieurs » entre la table « GoTo_Concordance » et « Unified Architecture ». Cette relation est établie par le champ « GIS Name », servant de clé primaire et de clé étrangère d'origine.

Datum_ID	<i>Le nom « officiel » de la caractéristique après sa découverte. Les deux derniers chiffres indiquent le type de caractéristique dont il s'agit : 01-19 : Monticule / 21-29 : Chultun / 31-39 : Carrière / 41-49 : Place / 51-59 : Dépression / 61-69 : Aguada / 71-79 : Terrasse / 81-89 : Talus / 91-99 : Tranchée de pilleurs / 101-109 : Historique / 111-119 : Monticule Chich / 131-139 : Place vide / 201-299 : Grande architecture / 900+ : Exceptionnel</i>
Year	<i>L'année où la caractéristique a été découverte et dessinée.</i>
Graphic_St	<i>Une initiale indiquant le type d'architecture : M : Monticule / P : Place / Q : Carrière / T : Terrasse / LT : Looter's trench / B : Berm / C : Chultun / D : Dépression / CHI : Monticule de Chich / A : Aguada / H : Historique / CT : Monticule de chert / E : Exceptionnel / RR, SP, PL, PA : Grande architecture</i>
Type	<i>Nom des grands groupes architecturaux.</i>
GA_PK	<i>Nom du groupe plus large au sein de l'association de groupes auquel appartient la caractéristique.</i>
Map_Type	<i>Le type de groupe : ◦ PRU - Unité résidentielle principale ◦ SRU - Unité résidentielle secondaire ◦ SRS - Structure de portée solitaire ◦ LMI - Modification du sol individuelle ◦ LMG - Groupe de modification des sols</i>
MoundCnt	<i>Le nombre de monticules dans un groupe résidentiel.</i>
Has Plaza	<i>Indique si un groupe de monticules est associé à une place. 0 pour non, 1 pour oui.</i>
Group Diagonal	<i>La longueur, mesurée en diagonale d'une extrémité à l'autre d'un groupe architectural entier.</i>
SUM_LI	<i>L'investissement total en jours de travail investis d'un groupe architectural.</i>

Tableau 7 – Table attributaire de la couche « Unified Architecture »

Source : MesoAmerican Research Center

Individual Features (IF) : La couche IF contient des données uniques sur des structures individuelles, pouvant faire partie d'un groupe plus important représenté dans UA ou GA.

Champ	Description
Datum_ID	<i>Le nom « officiel » de la caractéristique après sa découverte. Les deux derniers chiffres indiquent le type de la caractéristique.</i>
IF_ID	<i>Le numéro après l'identificateur principal de Datum_ID indique s'il s'agit d'une partie d'un ensemble plus grand (par exemple, un seul monticule parmi un groupe de trois monticules s'appellera 01.1, le monticule suivant sera 01.2, puis 01.3).</i>
AM	<i>Un identificateur pour les tranchées de pilleurs pour indiquer dans quel monticule la tranchée a été creusée.</i>
Diag	<i>La longueur de la diagonale de la caractéristique individuelle (en mètres).</i>
LI	<i>L'investissement en travail (en jours de travail) investi dans la construction de la caractéristique individuelle.</i>
StrMxHt	<i>La hauteur du monticule</i>
StrHt	<i>Si le monticule est considéré comme « bas » (c'est-à-dire en dessous d'un mètre) ou élevé (c'est-à-dire au-dessus d'un mètre). 2 pour bas, 1 pour élevé.</i>
LT_Freq	<i>Le nombre de tranchées de pilleurs contenues dans un monticule.</i>

Tableau 8 – Table attributaire de la couche « Individual Features »

Source : MesoAmerican Research Center

Group Association (GA) : La couche GA est constituée de regroupements d'architectures pouvant englober différents « types » en se basant sur la proximité, l'orientation et la topographie.

Champ	Description
GA_PK	<i>Le nom du groupe GA.</i>
GA_Name	<i>Noms courants pour le groupe GA, généralement basés sur des grandes architectures importantes ou des zones à proximité desquelles se trouve l'architecture.</i>
Num_FeatTy	<i>Le nombre de types de caractéristiques différents dans le groupe GA.</i>
Num_IndivF	<i>Le nombre de caractéristiques individuelles dans le groupe GA.</i>

Tableau 9 – Table attributaire de la couche « Group Association »

Source : MesoAmerican Research Center

GoTo's (GoTo_Concordance spécifiquement) : Les points GoTo sont les points d'origine utilisés pour la navigation sur le terrain afin d'identifier les éléments architecturaux potentiels.

Champ	Description
GIS_Name	<i>Le nom d'origine du point.</i>
Datum_ID	<i>Le nom du point GoTo/caractéristique architecturale une fois qu'elle a été identifiée.</i>
A or R	<i>Accepté ou rejeté - si le point GoTo a été effectivement identifié comme une caractéristique ou non.</i>
GTC_Comm	<i>Commentaires sur la zone/caractéristique découverte.</i>

Tableau 10 – Table attributaire de la couche « GoTo_Concordance »

Source : MesoAmerican Research Center

Annexe 3

Diagramme UML de la géodatabase d'El Pilar

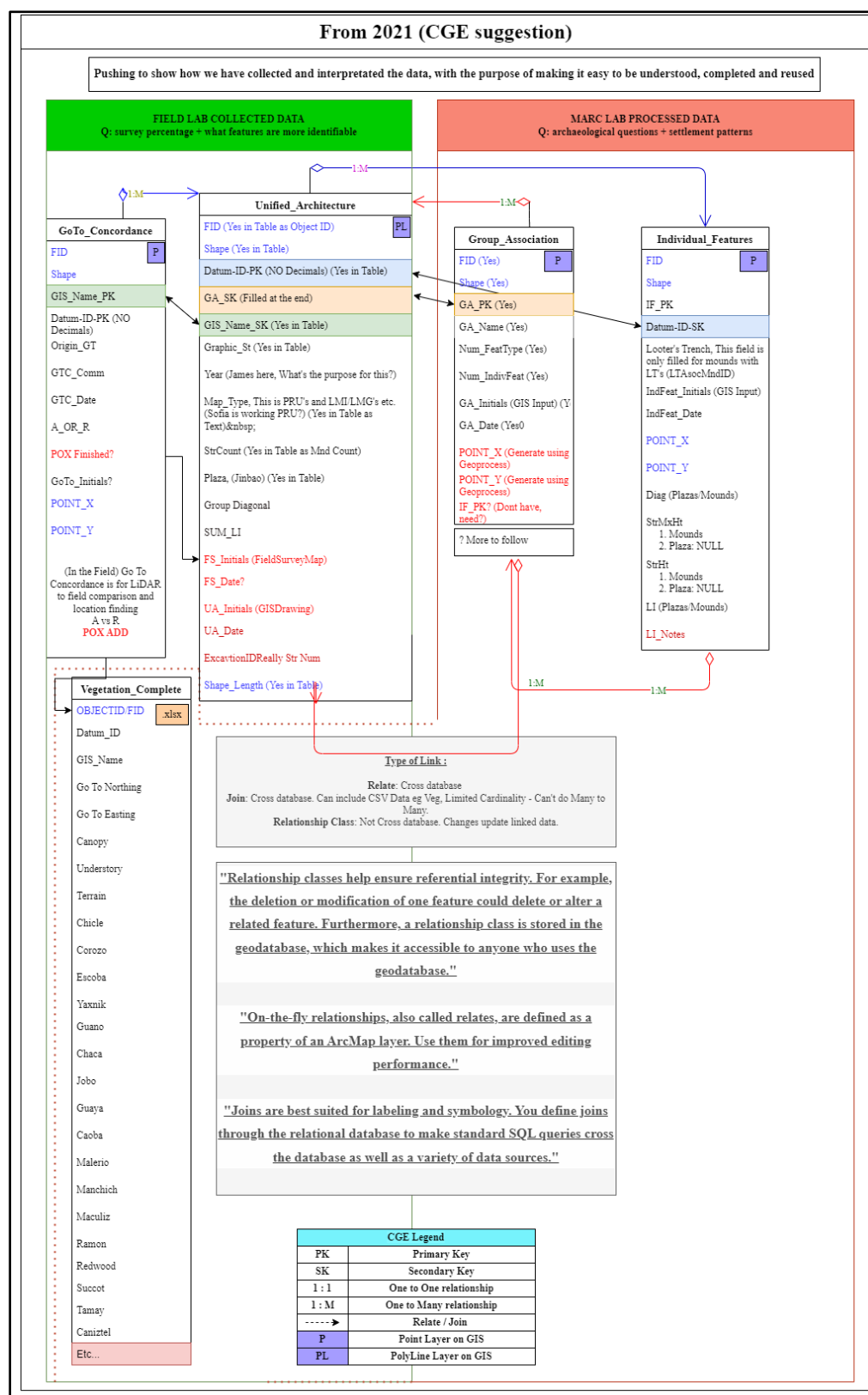


Figure 17 – Diagramme UML temporaire de la géodatabase d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center

Annexe 4

Le cycle Milpa

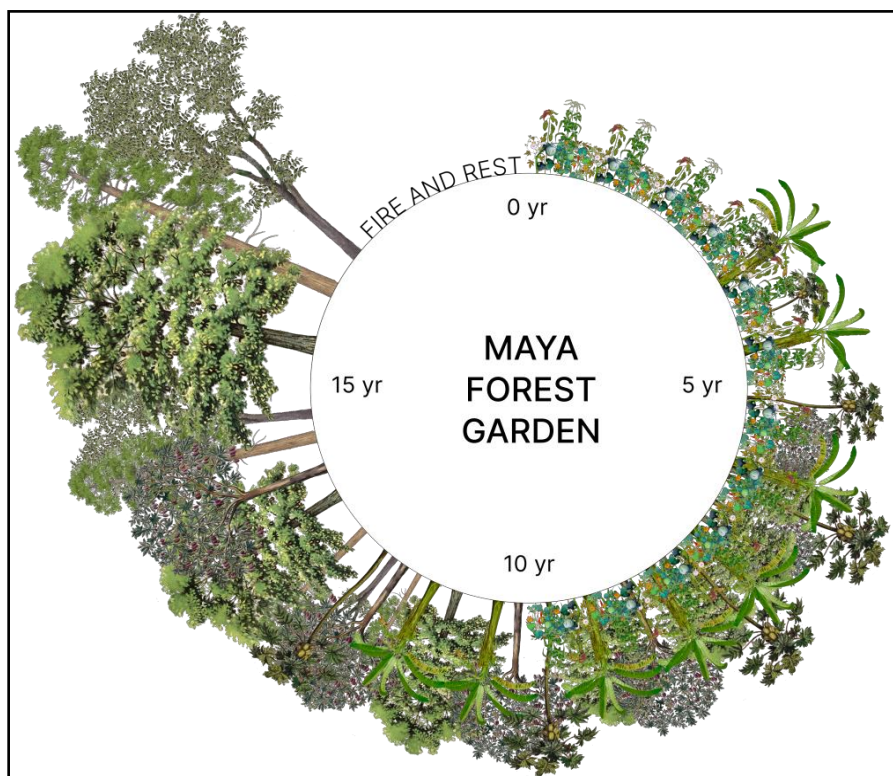


Figure 18 – Illustration du fonctionnement du cycle Milpa

Source : SYNTROPICS MATERIALS / <https://syntropicmaterials.eumo.it/polycultures>

Le cycle Milpa représente une symbiose agricole entre les champs et la forêt, formant un système pouvant être intensifié pour répondre aux besoins sans compromettre l'environnement dont les Mayas tiraient l'ensemble de leurs ressources.

Un des avantages de ce style de culture extrêmement diversifié est la réduction de l'érosion. Les arbres présents dans la Milpa fournissent de l'ombre au sol, ce qui l'empêche de se dessécher. Comme l'ombre réduit l'érosion et retient l'humidité, les racines des arbres maintiennent le sol en place face aux vents et même à la gravité sur les pentes et les collines. Ce cycle s'étend sur environ 20 ans et implique la sélection spécifique d'espèces végétales pour maintenir la forêt maya comme l'un des endroits les plus biodiversifiés au monde. Le cycle de la milpa se transforme en différentes étapes et redevient finalement une forêt à canopée fermée à la fin. Au moins deux tiers de la surface impliquée fait partie de la forêt, peu importe la phase du cycle Milpa, contribuant ainsi à la préservation de la forêt maya.¹²

¹² <https://mayaforestgardeners.org/farming/milpa-cycle/>

Formulaire de recensement de la végétation

[illegible]

Source : Belize River Archaeological Settlement

Annexe 6

Extrait du tableur recensant les données de végétation

Date	Datum_ID	GIS_Name	Go To Easting	Go To Northing	Canopy	Understory	Terrain	Chicle /Chicozapote	Cohune/Corozo
02/05/2022	4D8-01	4D8-A	274091	1908886	M	M	F		1
25/06/2019	4C8-02	4C8-A	274091	1909077	M	D	F		1
25/06/2019	4C8-03	4C8-B	274082	1908965	O	D	F		1
25/06/2019	4C8-01	4C8-Z	274066	1909055	M	D	F		1
01/01/2016	3H6-01		274054	1909838	M	M	P		1
25/06/2019	4A8-01	4A8-A	274050	1909400	M	D	F		1
03/05/2022	4C8-04	4C8-C	274043	1909073	O	D	F		1
25/04/2022	5D8-01	5D8-Z	274042	1907624	M	M	F		
01/01/2016	4A4-02		274038	1910023	M	M	P		1
01/01/2016	3H3-05		274034	1910156	M	M	P	1	1
01/01/2015	4B6-01		274012	1909205	O	O	F		1
28/04/2022	5C8-41	5C8-A	273988	1907880	O	D	S		
03/05/2022	4D8-02	4D8-Z	273986	1908804	M	D	S		1
01/01/2016	3G5-01		273971	1909856	O	O	F		1

Figure 20 – Capture d’écran d’une partie du tableur recensant l’intégralité des sites (et leurs caractéristiques) au sein desquels la végétation a été recensée

Source : MesoAmerican Research Center

Annexe 7

Modélisation du cycle Milpa par le biais d'ArcGIS Pro

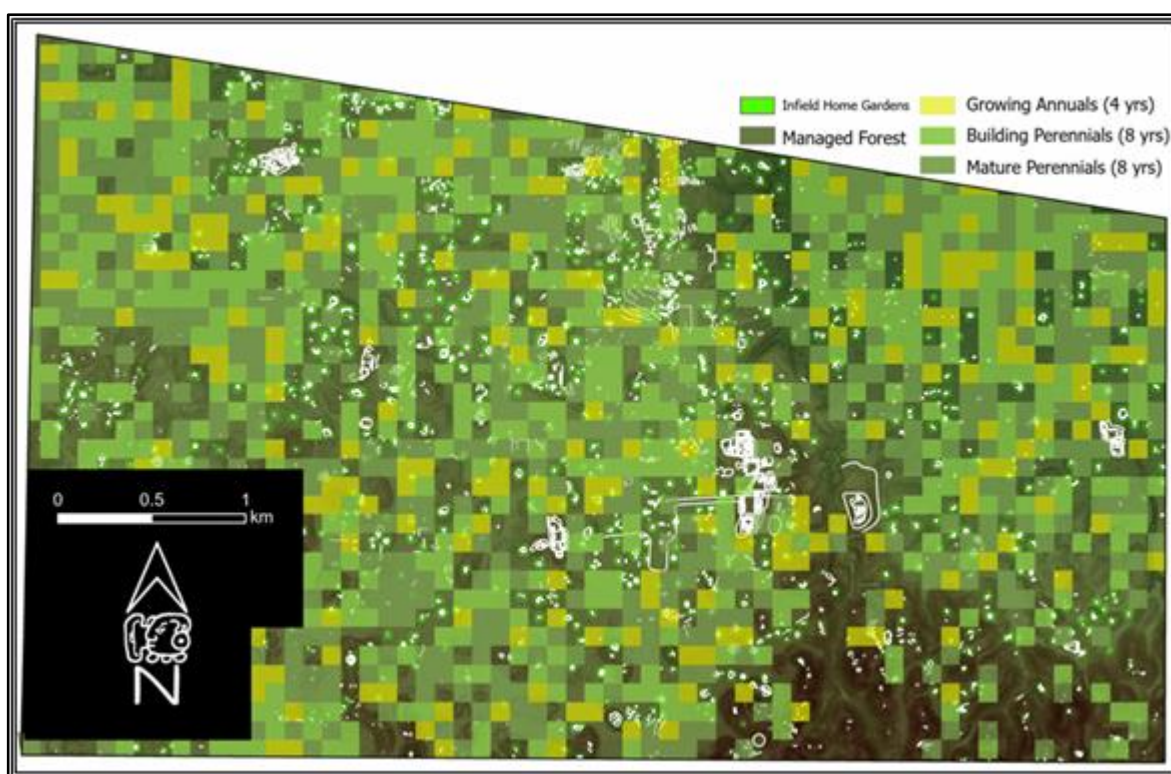


Figure 21 – Modélisation des rasters simulant le cycle Milpa au sein de la réserve archéologique d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center

Les « Maya Forest Gardeners » de la forêt maya ont généralement plus d'une Milpa à différentes étapes du cycle en cours simultanément. Cela maximise la multifonctionnalité du paysage et crée une rotation de cultures en mosaïque qui garantit la diversité dans les rendements des produits.

La première phase, de la forêt au champ, débute par le biais d'une parcelle forestière sélectionnée. Certains arbres sont valorisés, d'autres coupés, séchés et brûlés pour dégager la zone et nourrir le sol. Lors de la seconde phase, du champ au verger, des arbres fruitiers sont plantés, certains à croissance rapide, ombrage ceux à croissance plus lente. Pendant la troisième phase, du verger au jardin forestier, les arbres matures atteignent la maturité et produisent sur une base régulière. C'est lors de la seconde et de la troisième phase que sont trouvables la majorité des espèces utilisées pour la construction. La dernière étape est celle de la régénération forestière. Le jardin forestier se transforme en une forêt de bois durs, la canopée se formant au-dessus des arbres fruitiers. La milpa retrouve un état similaire à avant le défrichage, gérée sans sous-bois.

Annexe 8

Cartes de répartition des arbres de copal au sein d'El Pilar

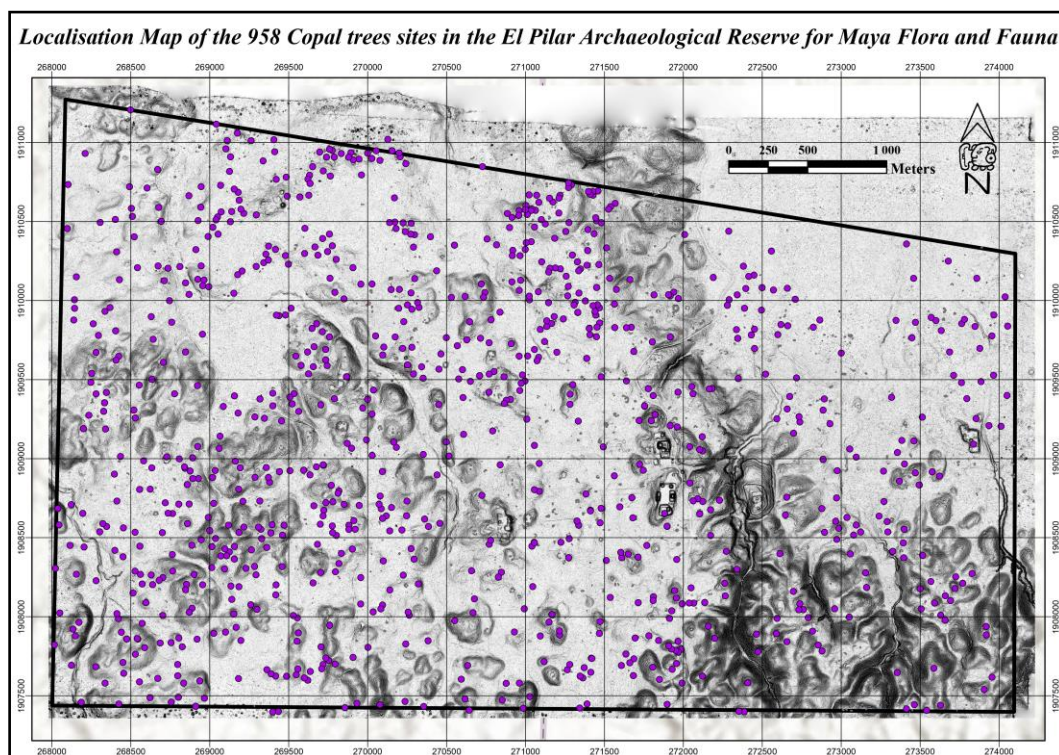


Figure 22 – Carte de répartition des arbres de copal au sein d'El Pilar (« Bone Map »)

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

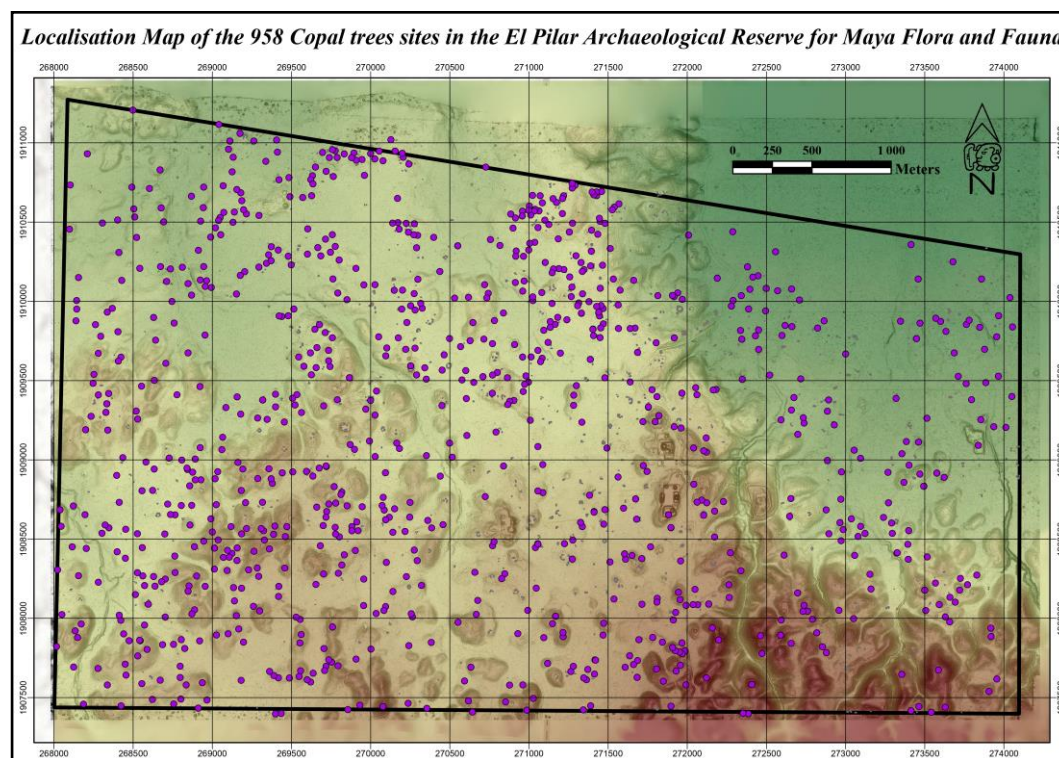


Figure 23 – Carte de répartition des arbres de copal au sein d'El Pilar (« Bone Map » + symbologie spécifique)

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Annexe 9

Optimisation de la construction : Conception simplifiée de l'habitat des anciens Mayas

Avant d'effectuer les calculs, il était essentiel de mettre en place un modèle d'habitat qui servirait de base à ces calculs. Initialement, le modèle choisi était issu du livre intitulé « Xa'anil naj - LA GRAN CASA DE LOS MAYAS » (Sánchez Suárez, 2017). Néanmoins, les « Maya Forest Gardeners » trouvaient ce dernier incomplet.

Un modèle à échelle réduite a alors été construit manuellement, de sorte qu'il soit conforme à leurs exigences, comme l'illustre la figure 24.

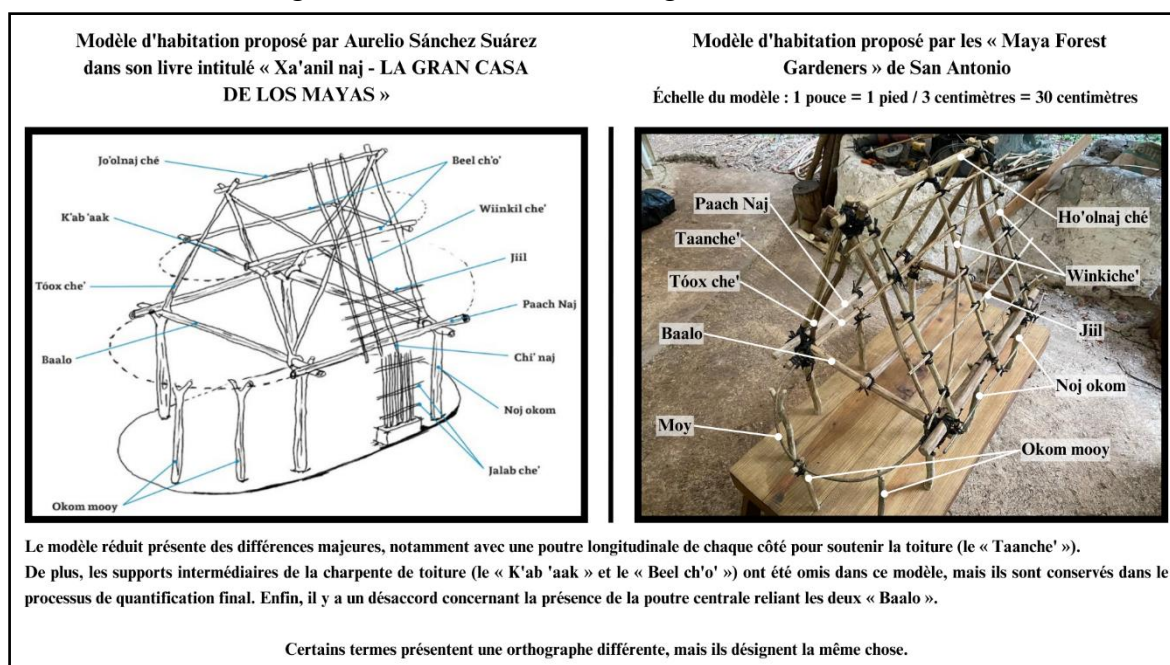


Figure 24 – Comparaison et décomposition du modèle utilisé pour la quantification des matériaux

Source : SUÁREZ A, Xa'anil naj LA GRAN CASA DE LOS MAYAS, 2017 / Personnelle

À partir du tableau répertoriant toutes les espèces végétales, il a été entrepris de déterminer les espèces pouvant être utilisées dans le cadre du processus de construction.

Toujours en concertation avec les « Maya Forest Gardeners » de la ville de San Antonio, appuyés par l'ouvrage cité précédemment, 54 des 163 espèces se vont vues attribuer un (ou plusieurs) rôle(s) dans la construction des logements des anciens Mayas. Afin de simplifier le modèle d'habitation mentionné précédemment, les éléments structurels ont été regroupés en trois catégories distinctes. De plus, une catégorie spéciale a été dédiée aux éléments constituant la couverture végétale du toit.

❖ Poteaux / Montants (« *Posts* »)

Cette catégorie regroupe trois des douze éléments composant le modèle initial : les « Noj okom », les « Okom mooy » et enfin les « Moy ».

Les poteaux sont des éléments verticaux utilisés pour soutenir la structure de la maison. Dans l'architecture maya, ils sont disposés de manière à former une colonnade qui soutient les poutres horizontales formant la toiture. Leur nombre varie en fonction de la superficie de la structure bâtie.

❖ Poutres (« *Beams* »)

Cette classification englobe la majorité des composants du modèle initial, avec notamment les « Baalo », « Paach Naj », « Taanche' », « K'ab ak », « Ho'Inache » et « Beel ch'o' ».

Les poutres, quant à elles, sont des éléments horizontaux qui reposent sur les poteaux et soutiennent la structure du toit. Elles sont légèrement inclinées, formant une pente douce vers l'extérieur.

❖ Chevrons (« *Rafters* »)

Cette sélection rassemble le restant des fondements du modèle initial : les « Winkiche' » et les « Tooxche ». Les « Jill » ne sont pas pris en compte du fait de leur finesse, et donc de la disponibilité accrue des matériaux relatifs à leur conception.

Les chevrons sont des éléments diagonaux indispensables. Ils jouent un rôle crucial dans le soutien de la toiture. Attachés aux poutres, ils forment une charpente triangulaire qui confère une stabilité accrue à l'ensemble de la structure. Recouverts de palmes, ils s'intègrent harmonieusement à la composition de la toiture, assurant ainsi une protection efficace contre les intempéries.

❖ Feuilles pour la toiture

Les anciens Mayas privilégiaient la feuille de Guano, également connue sous le nom de *Sabal Mauritiiformis*, comme matériau exclusif pour leurs toitures végétales. Cette composante fait l'objet d'une illustration, par le biais de la figure 25.



Figure 25 – Photographies des feuilles de *Sabal Mauritiiformis* composant les toitures végétales des habitations mayas

Source : Personnelle

Au sein de la réserve archéologique d'El Pilar, cette plante est présente dans la majorité écrasante des sites où la végétation a été étudiée. En effet, sur les 1575 sites recensés, elle est observée dans 1394, représentant ainsi plus de 88% de l'ensemble.

Selon les « Maya Forest Gardeners », elle a une durée de vie de 20 ans en tant que revêtement de toiture, nécessitant ainsi un remplacement complet du couvert à échéance. En revanche, les feuilles de Corozo, ou *Attalea cohune*, qui constituaient une alternative non retenue, avaient une durée de vie réduite de moitié.

Annexe 10

Détail du calcul estimant le nombre de feuilles de *Sabal Mauritiiformis* par hectare au sein d'El Pilar

Lorsque l'on effectue une conversion de la superficie en mètres carrés, un hectare équivaut à 10 000 mètres carrés.

Si les arbres sont espacés de 3 mètres, ils occupent une surface circulaire d'un rayon de 1,5 mètre (la moitié de l'espacement). L'aire d'un cercle se calcule avec $A = \pi r^2$, où A est l'aire et r le rayon. Pour un arbre, $A \approx 7,07 \text{ m}^2$.

En divisant la superficie totale (10 000 m²) par l'aire d'un arbre (7,07 m²), on obtient environ **1 414,21 arbres par hectare**.

Ainsi, dans une zone de 100 mètres sur 100 mètres avec des arbres espacés de 3 mètres, il y aurait environ **1414 arbres par hectare**. Si chaque arbre a en moyenne 10 feuilles, cela donne **14140 feuilles par hectare**.

Cependant, cette estimation peut être exagérée en raison de l'utilisation de formes circulaires pour représenter l'espace occupé par chaque arbre. C'est pourquoi une estimation se basant sur des formes carrées, où les arbres occupent toute la superficie sans espaces vides, est réalisée, afin de quantifier cette exagération.

Si les arbres sont espacés de 3 mètres dans une disposition carrée, chaque arbre occupe une surface de 9 m².

En divisant la superficie totale (10 000 m²) par la surface occupée par un arbre (9 m²), on obtient environ **1 111,11 arbres par hectare**.

Avec une disposition carrée et un espacement de 3 mètres, on obtient environ **1111 arbres par hectare**, soit **11110 feuilles par hectare**. Choisir une disposition carrée au lieu d'une disposition circulaire réduit l'estimation d'environ 303 arbres par hectare, soit 3030 feuilles par hectare.

Annexe 11

Corrélation entre la longueur de la diagonale et la surface des monticules

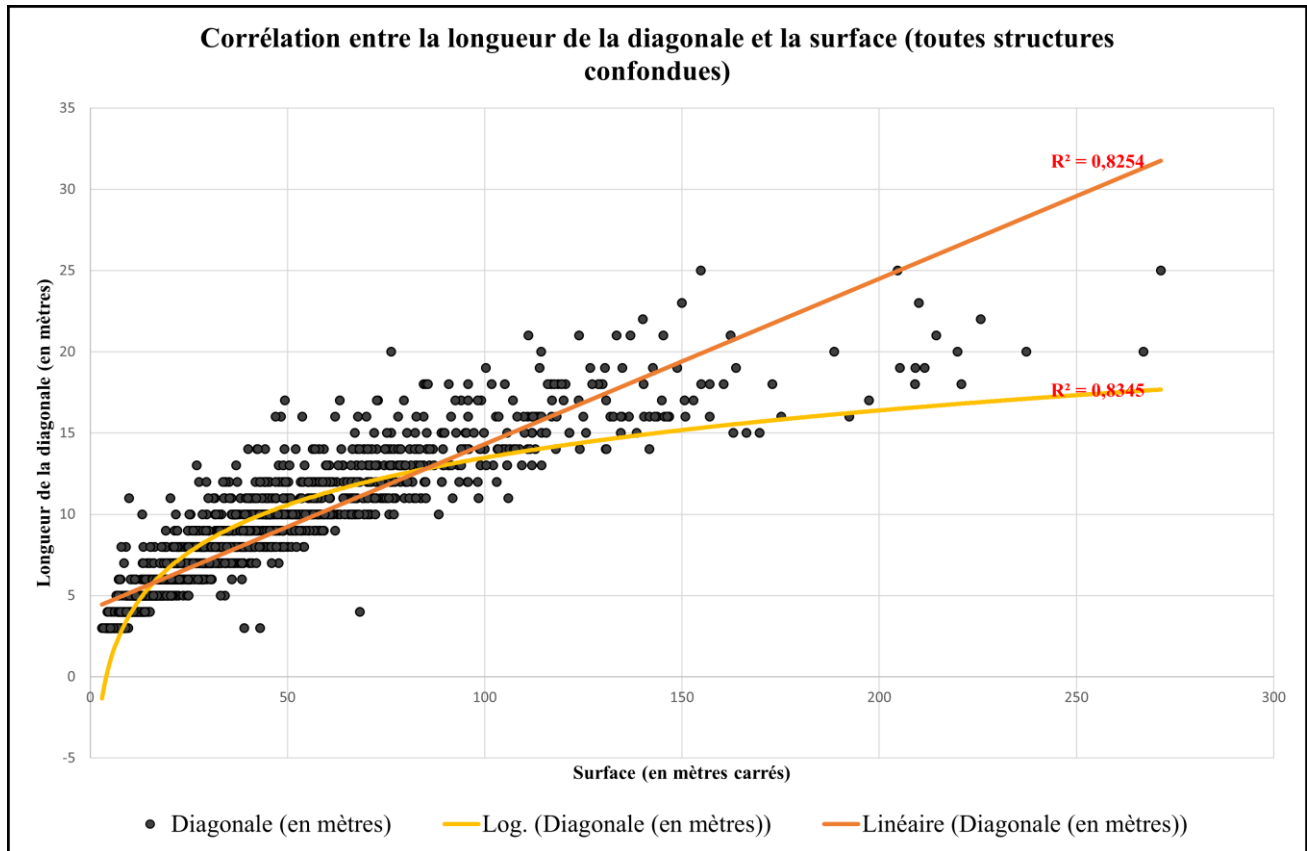


Figure 26 – Graphique montrant la corrélation entre la longueur de la diagonale et la surface des monticules

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Le coefficient de détermination, noté R^2 , évalue la qualité d'ajustement d'un modèle de régression aux données observées. En d'autres termes, il mesure à quel point les valeurs prédites par le modèle sont proches des valeurs réelles observées. R^2 varie de 0 à 1 : 0 signifie que le modèle n'explique pas la variance, tandis que 1 signifie qu'il l'explique parfaitement. Un R^2 proche de 1 indique un bon ajustement du modèle aux données.

Il est intéressant de noter que la corrélation entre les deux variables n'est pas parfaite. Cela s'explique principalement par la différence dans la manière dont ces valeurs sont générées. La valeur de la surface est directement calculée à partir d'ArcGIS Pro, étant donné qu'il s'agit d'une étude de polygones. En revanche, la valeur de la diagonale est mesurée sur le terrain par les archéologues à l'aide d'un mètre à ruban. Ces mesures ne sont donc pas très précises et sont généralement arrondies à l'unité supérieure.

Annexe 12

Extrait du tableur comprenant les champs utilisés pour la classification des monticules

Datum_ID	Individual_ID	Area (in square meters)	Diagonal length (in meters)	Approximate height (in meters)	Structure type		
4F3-01	4F3-01.3	6	3	0,1	PRU		
8F6-02	8F6-02.2	11	4	0,1	PRU		
3G7-05	3G7-05.1	10	4	0,1	SRU		
9F2-09	9F2-09.3	14	4	0,1	SRU		
6B6-03	6B6-03.1	34	5	0,1	PRU		
1C6-03	1C6-03.1	13	5	0,1	SRU		
3F6-05	3F6-05.1	11	5	0,1	SRU		
3F7-02	3F7-02.1	16	6	0,1	SRU		
9A6-02	9A6-02.1	23	6	0,1	SRU		
6B6-04	6B6-04.1	22	7	0,1	PRU		
9F2-05	9F2-05.2	22	7	0,1	SRU		
4B6-01	4B6-01.1	33	8	0,1	SRU		
9A6-01	9A6-01.1	36	9	0,1	SRU		
3F1-01	3F1-01.1	53	10	0,1	SRU		
2H5-02	2H5-02.6	55	11	0,1	PRU		
9D5-03	9D5-03.1	57	11	0,1	SRU		
3F7-03	3F7-03.1	19	8	0,2	SRU		
2F1-05	2F1-05.2	4	3	0,2	PRU		
8B2-05	8B2-05.1	6	3	0,2	PRU		
9E3-02	9E3-02.6	5	3	0,2	PRU		
7B7-02	7B7-02.2	5	3	0,2	SRU		
7B7-02	7B7-02.3	4	3	0,2	SRU		
7C7-01	7C7-01.3	9	3	0,2	SRU		
7E10-03	7E10-03.1	6	3	0,2	SRU		
8D5-01	8D5-01.2	4	3	0,2	SRU		
1B5-04	1B5-04.3	11	4	0,2	PRU		
2H4-03	2H4-03.3	7	4	0,2	PRU		
5A4-02	5A4-02.2	9	4	0,2	PRU		
8C9-01	8C9-01.2	10	4	0,2	PRU		
3E1-01	3E1-01.1	10	4	0,2	SRU		
3F6-02	3F6-02.1	10	4	0,2	SRU		
3G6-02	3G6-02.1	10	4	0,2	SRU		
5D4-03	5D4-03.3	4	4	0,2	SRU		
						Structure type	Percentage
						1736 PRU	74%
						494 SRU	21%
						109 SRS	5%
						Number of mounds with an approximate height of less than 1 meter	
						1046 "low" mounds (552 PRU - 494 SRU - 0 SRS)	
						Number of mounds with an approximate height of between 1 and 2 meters (1 included)	
						879 "medium" mounds (816 PRU - 1 SRU - 62 SRS)	
						Number of mounds with an approximate height of over 2 meters (2 included)	
						414 "high" mounds (368 PRU - 0 SRU - 46 SRS)	
						Number of mounds with a diagonal length between 3 and 6 meters	
						1037 "small" mounds (682 PRU - 354 SRU - 1 SRS)	
						Number of mounds with a diagonal length between 7 and 11 meters	
						921 "mid" mounds (747 PRU - 125 SRU - 49 SRS)	
						Number of mounds with a diagonal length over 11 meters	
						381 "large" mounds (307 PRU - 15 SRU - 59 SRS)	

Figure 27 – Capture d'écran d'une partie du tableur comprenant les champs utilisés pour la classification des monticules avant la quantification

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Annexe 13

Histogrammes de la distribution de la longueur de la diagonale des monticules

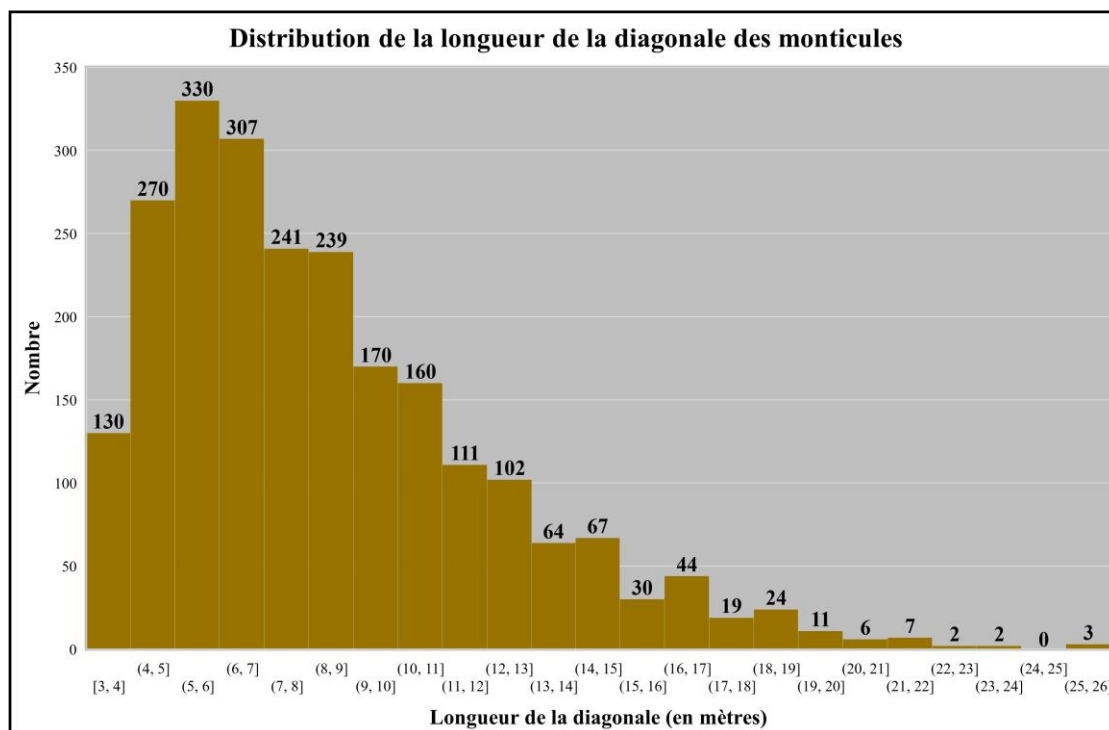


Figure 28 – Distribution de la longueur diagonale des 2339 monticules individuels de la réserve archéologique d'El Pilar

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

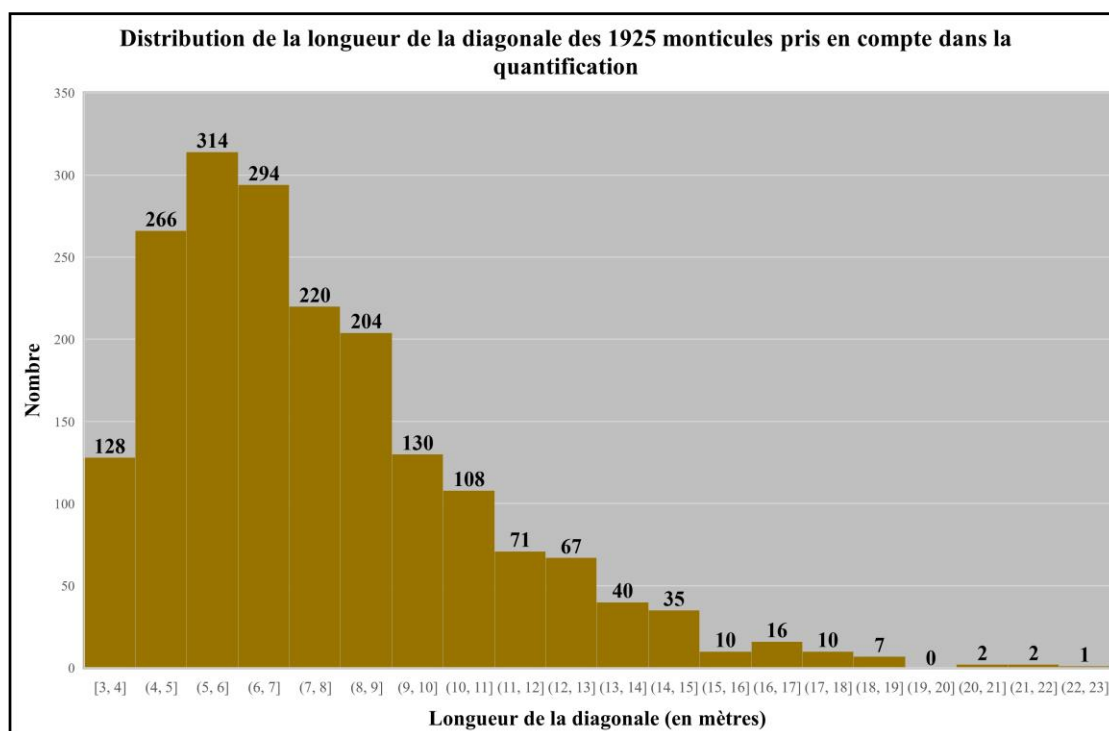


Figure 29 – Distribution de la longueur diagonale des 1925 monticules individuels éligibles à la quantification

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Annexe 14

Tableaux de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules (avant et après fusion des deux premières catégories)

Approximate height / Diagonal length Breakdown (PRU-SRU-SRS)	Small [3 to 6 meters]	Mid [7 to 11 meters]	Large [12 to 25 meters]	Total number of mounds (PRU-SRU-SRS)
Low [0 to 0,99 meters]	687 (333-354-0)	306 (181-125-0)	53 (38-15-0)	1046 (552-494-0)
Medium [1 to 1,99 meters]	315 (314-1-0)	427 (393-0-34)	137 (109-0-28)	879 (816-1-62)
High [2 meters and over]	35 (35-0-0)	188 (173-0-15)	191 (160-0-31)	414 (368-0-46)
Total number of mounds (PRU-SRU-SRS)	1037 (682-355-0)	921 (747-125-49)	381 (307-15-59)	2339

Tableau 11 – Tableau de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules avant la fusion des deux premières catégories

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Approximate height / Diagonal length Breakdown (PRU-SRU-SRS)	Small [3 to 6 meters]	Mid [7 to 11 meters]	Large [12 to 25 meters]	Total number of mounds (PRU-SRU-SRS)
Low and Medium [0 to 1,99 meters]	1002 (647-355-0)	733 (574-125-34)	190 (147-15-28)	1925 (1368-495-62)
High [2 meters and over]	35 (35-0-0)	188 (173-0-15)	191 (160-0-31)	414 (368-0-46)
Total number of mounds (PRU-SRU-SRS)	1037 (682-355-0)	921 (747-125-49)	381 (307-15-59)	2339

Tableau 12 – Tableau de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules après la fusion des deux premières catégories

Source : MesoAmerican Research Center – Données de la géodatabase du 22/06/2023

Selon les classifications établies, parmi les 2339 monticules, ceux ayant une hauteur approximative de 2 mètres et plus sont exclus du calcul. Cela signifie donc qu'un total de 414 monticules, représentant environ 18 % des données, ne sont pas pris en considération.

Annexe 15

Détail du processus de quantification des coûts de construction de logement en termes de matériaux

❖ Calcul du nombre de matériaux requis pour chaque catégorie de composant (poteaux, poutres, chevrons et feuilles)

En décomposant complètement le modèle de logement utilisé pour les calculs, il a été possible de déterminer les besoins en matériaux pour chaque catégorie de composant.

❖ Poteaux

Pour les structures des catégories « petite » et « moyenne », 12 poteaux sont nécessaires (4 « Noj Okom » + 6 « Okom Mooy » + 2 « Mooy »). Pour les structures de la catégorie « large », 14 sont nécessaires (6 « Noj Okom » + 6 « Okom Mooy » + 2 « Mooy »).

En multipliant le nombre de structures par catégorie de longueur diagonale par le nombre de poteaux ((25*12) + (19*12) + (5*14)), il apparaît que **598 poteaux** seraient nécessaires dans le processus de construction sur une base annuelle.

❖ Poutres

Pour les structures des catégories « petite » et « moyenne », 19 poutres sont nécessaires. Pour les structures de la catégorie « large », il en faut 35. Ce nombre est obtenu en sommant le nombre d'éléments structurels de la toiture et est directement lié au nombre de poteaux et de « Tijeras ». Il est de 2 pour les deux premières catégories, et de 3 pour la dernière.

En multipliant le nombre de structures par catégorie de longueur diagonale par le nombre de poutres ((25*19) + (19*19) + (5*35)), il apparaît que **1011 poutres** seraient nécessaires dans le processus de construction sur une base annuelle.

❖ Chevrons

Le calcul du nombre de chevrons est plus complexe que les deux précédents. La décomposition suggère qu'un « Winkiche' » est nécessaire tous les mètres (en commençant le décompte à partir de 0, avec un composant de chaque côté) + 2 « Tooxche » pour chaque « Tijeras ». Il est de 2 pour les deux premières catégories, et de 3 pour la dernière.

Ces besoins peuvent être traduits par les équations suivantes : $2x + 6$, où x est la longueur de la diagonale (pour les deux premières catégories de longueur diagonale) ; $2x + 8$ (pour la troisième et dernière catégorie de longueur diagonale).

En s'intéressant à la distribution des valeurs de longueur diagonale pour les 1925 monticules considérés dans le processus de quantification (disponible via l'annexe 13) et en analysant les monticules de chacune des trois catégories en fonction de leur longueur diagonale, il est possible d'isoler des pourcentages spécifiques à chaque valeur de cette longueur.

- ❖ Pour la catégorie « petite », comprenant 1 002 monticules, 128 ont une longueur diagonale de 3 mètres, 266 de 4 mètres, 314 de 5 mètres et 294 de 6 mètres. En traduisant ces valeurs en pourcentages, 13 % ont une longueur diagonale de 3 mètres, 27 % de 4 mètres, 31 % de 5 mètres et 29 % de 6 mètres.
- ❖ Pour la catégorie « moyenne », comprenant 733 monticules, 220 ont une longueur diagonale de 7 mètres, 204 de 8 mètres, 130 de 9 mètres, 108 de 10 mètres et 71 de 11 mètres. En traduisant ces valeurs en pourcentages, 30 % ont une longueur diagonale de 7 mètres, 28 % de 8 mètres, 18 % de 9 mètres, 15 % de 10 mètres et 9 % de 11 mètres.
- ❖ Pour la catégorie « large », composée de 190 monticules, 67 ont une longueur diagonale de 12 mètres, 40 de 13 mètres, 35 de 14 mètres, 10 de 15 mètres, 16 de 16 mètres, 10 de 17 mètres, 7 de 18 mètres, 2 de 20 mètres, 2 de 21 mètres et 1 de 22 mètres. En traduisant ces valeurs en pourcentages, 35 % ont une longueur diagonale de 12 mètres, 21 % de 13 mètres, 18 % de 14 mètres, 6 % de 15 mètres, 8 % de 16 mètres, 6 % de 17 mètres, 4 % de 18 mètres, 1 % de 20 mètres, 1 % de 21 mètres et 0 % de 22 mètres.

En multipliant **le nombre de structures par catégorie de longueur diagonale** par **les équations présentées précédemment, pour chacune des trois catégories**, et en remplaçant x par **la somme des facteurs associés à chaque pourcentage de longueur multiplié par chacune des valeurs spécifiques de longueur diagonale pour les trois catégories**, on obtient **le nombre de chevrons par catégorie**.

- ❖ Pour la catégorie « petite », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$25*(2*((0,13*3)+(0,27*4)+(0,31*5)+(0,29*6))+6) = 388$$

❖ Pour la catégorie « moyenne », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$19*(2*((0,37)+(0,288)+(0,189)+(0,1510)+(0,09*11))+6) = 435$$

❖ Pour la catégorie « large », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$5*(2*((0,3512)+(0,2113)+(0,1814)+(0,0615)+(0,0816)+(0,0617)+(0,0418)+(0,0120)+(0,01*21))+8) = 178$$

En additionnant le résultat des trois équations, il apparaît que 1001 chevrons seraient nécessaires dans le processus de construction sur une base annuelle.

❖ Feuilles

Avant de discuter de la quantification des matériaux de toiture nécessaires, il est nécessaire de calculer deux facteurs spécifiques à ce processus. En effet, les PRU et les SRS sont distincts des SRU. Ces derniers, représentant des résidences secondaires qui servaient de structures auxiliaires et de stockage agricole dans les zones périphériques, étaient équipées d'un toit de moins bonne facture comparé à celui des PRU et des SRS.

En mesurant des monticules sur le terrain, il a été statué qu'une structure mesurant 10 x 4 mètres, c'est-à-dire 40 mètres carrés, a une longueur diagonale d'environ 11 mètres.

De plus, selon les « Maya Forest Gardeners », un PRU (ou un SRS) d'une surface de 40 mètres carrés nécessite 10000 feuilles pour la construction de son toit. Par conséquent, il est possible d'en déduire un facteur indiquant le nombre de feuilles par mètre de longueur diagonale. Le raisonnement est le même pour un SRU, sachant que 3000 feuilles sont nécessaires pour une longueur diagonale de 5 mètres. Le facteur pour les PRU et les SRS est de 910 feuilles par mètre de longueur diagonale, tandis qu'il est de 600 pour les SRU.

Une structure avec une longueur diagonale de 11 mètres aura donc 10000 feuilles si c'est un PRU ou un SRS, et 6 600 feuilles si c'est un SRU.

Par conséquent, en multipliant le nombre de structures dans chacune des trois catégories, en tenant compte de **la répartition des PRU/SRS et des SRU**, par **les mêmes facteurs dérivés de la distribution de la longueur diagonale**, multipliés eux-mêmes par **le nombre de feuilles requis** auxquelles on ajoute **le facteur associé aux PRU/SRS ou celui associé aux SRU**, il est possible de d'obtenir **le nombre de feuilles par catégorie**.

❖ Pour la catégorie « petite », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$16 * ((0.13 * 3000) + (0.27 * (3000 + 910)) + (0.31 * (3000 + (910 * 2))) + (0.29 * (3000 + (910 * 3)))) + 9 * ((0.13 * 1800) + (0.27 * (1800 + 600)) + (0.31 * (1800 + (600 * 2))) + (0.29 * (1800 + (600 * 3)))) = 99330$$

❖ Pour la catégorie « moyenne », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$16 * ((0.3 * 6640) + (0.28 * (6640 + 910)) + (0.18 * (6640 + (910 * 2))) + (0.15 * (6640 + (910 * 3))) + (0.09 * (6640 + (910 * 4)))) + 3 * (((0.3 * 4200) + (0.28 * (4200 + 600)) + (0.18 * (4200 + (600 * 2))) + (0.15 * (4200 + (600 * 3))) + (0.09 * (4200 + (600 * 4)))) = 142562$$

❖ Pour la catégorie « large », l'équation peut s'exprimer comme suit :

$$5 * ((0.35 * 10910) + (0.21 * (10910 + 910)) + (0.18 * (10910 + (910 * 2))) + (0.06 * (10910 + (910 * 3))) + (0.08 * (10910 + (910 * 4))) + (0.06 * (10910 + (910 * 5))) + (0.04 * (10910 + (910 * 6))) + (0.01 * (10910 + (910 * 8))) + (0.01 * (10910 + (910 * 9)))) = 62649$$

En additionnant le résultat des trois équations, il apparaît que **304541 feuilles** seraient nécessaires dans le processus de construction sur une base annuelle.

❖ **Répartition des matériaux selon le type de croissance des arbres et quantification par surface (en kilomètres carrés et hectares)**

Certains arbres jouaient un rôle spécifique dans le processus de construction des maisons mayas, remplissant parfois plusieurs rôles. Autrement dit, un arbre pouvait être utilisé comme poteau, poutre ou chevron selon sa croissance. Cependant, il est important de considérer que tous les arbres ne poussaient pas pendant les mêmes étapes du cycle Milpa, le temps de croissance variait en fonction de l'élément structurel souhaité. Par exemple, les poteaux nécessitaient environ 20 ans de croissance, tandis que ce temps était divisé par deux pour les poutres et les chevrons. C'est pourquoi le même arbre pouvait s'insérer dans deux cycles du Milpa (secondaire et mature, par exemple), comme l'illustre le tableau 13.

Type de croissance forestière	Secondaire	Mature	Forestier	Total
Nombre d'arbres	19	43	2	64
Répartition (Poteaux – Poutres – Chevrons)	(3 – 19 – 14)	(12 – 24 – 26)	(2 – 0 – 0)	(17-43-40)

Tableau 13 – Répartition des 53 arbres utilisés pour les anciens abris mayas au sein des différentes phases du cycle Milpa

Source : Personnelle

❖ Poteaux

En divisant le nombre de poteaux requis précédemment calculé par la surface de chaque phase du cycle Milpa correspondant en kilomètres carrés, multipliée par le facteur associé au type de croissance forestière, on obtient **le nombre de poteaux nécessaires à la construction de 49 maisons mayas annuelles par kilomètre carré.**

Mentionné dans la section II.2.4, la surface de la phase secondaire et mature est identique (5,28 km²), tandis que celle de la phase forestière est de 6,1 km². Parmi les 17 arbres utilisés comme poteaux pour les constructions, 3 (18 %) sont dans la période secondaire, 12 (71 %) sont dans la période mature et 2 (12 %) sont dans la période forestière.

Les équations peuvent s'exprimer comme suit :

$$❖ (598/5,28)*0,18 \approx 21$$

$$❖ (598/5,28)*0,71 \approx 81$$

$$❖ (598/6,1)*0,12 \approx 12$$

En conséquence :

- ❖ **21 poteaux par kilomètre carré** sont nécessaires chaque année dans la zone de croissance secondaire. Via une division par 100, on obtient **0,21 poteau par hectare.**
- ❖ **81 poteaux par kilomètre carré** sont nécessaires chaque année dans la zone de croissance mature. Via une division par 100, on obtient **0,81 poteau par hectare.**
- ❖ **12 poteaux par kilomètre carré** sont nécessaires chaque année dans la zone de croissance forestière. Via une division par 100, on obtient **0,12 poteau par hectare.**

❖ Poutres

En divisant le nombre de poutres requis précédemment calculé par la surface de chaque phase du cycle Milpa correspondant en kilomètres carrés, multipliée par le facteur associé au type de croissance forestière, on obtient **le nombre de poutres nécessaires à la construction de 49 maisons mayas annuelles par kilomètre carré.**

Sur les 43 arbres utilisés comme poutres pour les constructions, 19 (44 %) se trouvent dans la période secondaire et 24 (56 %) sont dans la période de maturité.

Les équations peuvent être exprimées comme suit :

$$\diamond (1011/5,28) * 0,44 \approx 85$$

$$\diamond (1011/5,28) * 0,56 \approx 108$$

En conséquence :

- ❖ 85 poutres par kilomètre carré sont nécessaires annuellement dans la zone de croissance secondaire. Via une division par 100, on obtient 0,85 poutre par hectare.
- ❖ 108 poutres par kilomètre carré sont nécessaires annuellement dans la zone de croissance mature. Via une division par 100, on obtient 1,08 poutre par hectare.

❖ Chevrans

En divisant le nombre de chevrons requis précédemment calculé par la surface de chaque phase du cycle Milpa correspondant en kilomètres carrés, multipliée par le facteur associé au type de croissance forestière, on obtient le nombre de chevrons nécessaires à la construction de 49 maisons mayas annuelles par kilomètre carré.

Sur les 40 arbres utilisés comme chevrons pour les constructions, 14 (35 %) se trouvent dans la période secondaire et 26 (65 %) sont dans la période de maturité.

Les équations peuvent être exprimées comme suit :

$$\diamond (1001/5,28) * 0,35 \approx 67$$

$$\diamond (1001/5,28) * 0,65 \approx 124$$

En conséquence :

- ❖ 67 chevrons par kilomètre carré sont nécessaires annuellement dans la zone de croissance secondaire. Via une division par 100, on obtient 0,67 chevron par hectare.
- ❖ 124 chevrons par kilomètre carré sont nécessaires annuellement dans la zone de croissance mature. Via une division par 100, on obtient 1,24 chevron par hectare.

❖ Feuilles

Alfonso Tzul, l'un des « Maya Forest Gardeners » avait stipulé que, lors de la période de maturité du cycle Milpa, les palmiers de Guano étaient espacés d'environ 3 mètres en grappes denses. En annexe 10, le nombre de palmiers de *Sabal Mauritiiformis* a été estimé à 1111 par hectare. Sachant qu'en moyenne un palmier a 10 feuilles viables pour la construction de toiture, cela donnait 11110 feuilles de *Sabal Mauritiiformis* disponibles par hectare.

Les feuilles de palmier Guano les plus épaisses utilisées pour la toiture se trouvaient dans la période de maturité du cycle Milpa. Cependant, le pourcentage exact de viabilité de cette période de croissance pour les besoins en feuilles restait inconnu. Par conséquent, il a été convenu qu'un minimum de 50 % et un maximum de 100 % de cette surface était viable pour cette hypothèse, fournissant un intervalle de valeurs en termes de nombre de feuilles par unité de surface requise.

Pour obtenir **la valeur hypothétique la plus basse du nombre de feuilles nécessaires**, le **nombre de feuilles requises déterminé précédemment** est divisé par **la surface de la période de maturité**.

Pour obtenir **la valeur la plus haute**, le calcul est identique mais **la surface de la période de maturité** est multipliée par **un facteur de 0,5 (50 %)**, ce qui revient à la diviser par 2.

Pour la valeur hypothétique la plus basse, l'équation peut être exprimée comme suit :

$$❖ \quad 304541/5,28 = 57678$$

Pour la valeur hypothétique la plus haute, l'équation peut être exprimée comme suit :

$$❖ \quad 304541/(5,28*0,5) = 115356$$

En conséquence :

- ❖ Pour la valeur hypothétique la plus basse, **57678 feuilles par kilomètre carré** sont nécessaires annuellement dans la zone de croissance associée. Via une division par 100, on obtient **576,8 feuilles par hectare**.
- ❖ Pour la valeur hypothétique la plus haute, 115356 feuilles par kilomètre carré sont nécessaires annuellement dans les zones de croissance associées. Via une division par 100, on obtient **1153,6 feuilles par hectare**.

Annexe 16

Extrapolation des données issues de la quantification des matériaux disponibles en fonction de leur vocation dans le processus de construction

Composant	Quantités disponibles	Besoins annuels	Temps de croissance moyen	Besoins avant échéance d'une phase de croissance
Poteaux	[1 692, 3 540]	598	20 ans	11 960
Poutres	[973, 12 257]	1 011	10 ans	10 110
Chevrans	[0, 9436]	1 001	10 ans	10 010
Feuilles [50%]	2 933 040	304 541	5 ans	1 522 705
Feuilles [100%]	5 866 080	304 541	5 ans	1 522 705

Tableau 14 – Simulation des besoins en matériaux en fonction du temps de croissance des différents éléments structurels

Source : Personnelle

Les intervalles des quantités disponibles proviennent des chiffres de la figure 12. La valeur minimale concerne les espèces à une seule vocation dans la construction, tandis que la valeur maximale inclut en plus les espèces avec deux ou trois vocations. Cependant, ces chiffres peuvent être biaisés, car la phase de croissance des espèces végétales n'est pas prise en compte lors du recensement. Un arbre présent avec plusieurs vocations peut ne pas être éligible à toutes en raison de sa durée de croissance. Les quantités de feuilles disponibles proviennent du calcul de l'annexe 10, qui estime 11 110 feuilles de *Sabal Mauritiiformis* par hectare. Ce chiffre est multiplié par 50% (ou par la totalité) de la surface totale de la période mature du cycle Milpa à El Pilar (5,28 km²). Cependant, il est important de noter que la forêt actuelle est plus sauvage et moins cultivée qu'au moment du cycle Milpa. Parmi les 1 575 sites où la végétation a été recensée, 88% contiennent des palmiers de *Sabal Mauritiiformis*, mais ces données ne fournissent pas de quantités précises. Ainsi, il est difficile de déterminer si ces chiffres sont surestimés ou sous-estimés.

Les ressources disponibles semblent pouvoir assurer les besoins d'un cycle annuel, mais étant donné le manque d'informations quantitatives, il reste ardu de savoir si cette affirmation restera valable pour un cycle prolongée, notamment au vu des besoins en poteaux et de la disponibilité actuelle de ces derniers.

Liste des figures

Figure 1 – Carte de situation de la réserve archéologique d’El Pilar	9
Figure 2 – Fonctionnement du LiDAR aéroporté	10
Figure 3 – Bone Map de la réserve archéologique d’El Pilar pour la flore et la faune maya.....	13
Figure 4 – Subdivisions au sein de la réserve archéologique d’El Pilar pour la flore et la faune maya	19
Figure 5 – Exemple de mise en page utilisant la « Bone Map » et la division en quadrant.....	20
Figure 6 – Schéma explicatif du protocole de transfert des données SIG de la géodatabase d’El Pilar vers le GPS.....	21
Figure 7 – Carte de distribution spatiale du volume de données en lien avec la végétation au sein d’El Pilar.....	24
Figure 8 – Résumé des différents processus d’acquisition des données de végétation au sein du site d’El Pilar.....	25
Figure 9 – Traitements effectués pour palier au problème de géoréférencement des données de végétation	28
Figure 10 – Traitements effectués pour déterminer la couverture spatiale des données de végétation	30
Figure 11 – Distribution des 53 espèces végétales (hors toiture) selon les trois catégories d’éléments structurels.....	32
Figure 12 – Quantification des matériaux disponibles en fonction de leur(s) vocation(s) dans le processus de construction	33
Figure 13 – Processus de création de la couche de polygones des monticules individuels à des fins statistiques	36
Figure 14 – Processus de création du tableur incluant l’ajout des champs nécessaires à la classification des monticules	37
Figure 15 – Résumé de l’acquisition LiDAR sur le site d’El Pilar	50
Figure 16 - Carte de distribution spatiale du volume de données en lien avec la végétation au sein d’El Pilar.....	52
Figure 17 – Diagramme UML temporaire de la géodatabase d’El Pilar	55
Figure 18 – Illustration du fonctionnement du cycle Milpa	56
Figure 19 – Formulaire de recensement des différentes espèces végétales utilisé lors de la présence de monticule(s)	57
Figure 20 – Capture d’écran d’une partie du tableur recensant l’intégralité des sites (et leurs caractéristiques) au sein desquels la végétation a été recensée	58
Figure 21 – Modélisation des rasters simulant le cycle Milpa au sein de la réserve archéologique d’El Pilar.....	59
Figure 22 – Carte de répartition des arbres de copal au sein d’El Pilar (« Bone Map »).....	60
Figure 23 – Carte de répartition des arbres de copal au sein d’El Pilar (« Bone Map » + symbologie spécifique).....	60
Figure 24 – Comparaison et décomposition du modèle utilisé pour la quantification des matériaux	61
Figure 25 – Photographies des feuilles de <i>Sabal Mauritiiformis</i> composant les toitures végétales des habitations mayas	63
Figure 26 – Graphique montrant la corrélation entre la longueur de la diagonale et la surface des monticules.....	65
Figure 27 – Capture d’écran d’une partie du tableur comprenant les champs utilisés pour la classification des monticules avant la quantification.....	66
Figure 28 – Distribution de la longueur diagonale des 2339 monticules individuels de la réserve archéologique d’El Pilar	67
Figure 29 – Distribution de la longueur diagonale des 1925 monticules individuels éligibles à la quantification.....	67

Liste des tableaux

Tableau 1 – Couverture spatiale de la végétation par rapport à la surface cultivable et totale du site d’El Pilar.....	30
Tableau 2 – Composition et distribution de la canopée forestière de la réserve archéologique d’El Pilar	31
Tableau 3 – Répartition des 53 espèces végétales (hors toiture) selon les trois catégories d’éléments structurels	32
Tableau 4 – Besoins en matériaux liés au processus de construction des abris des anciens Mayas sur une base annuelle.....	40
Tableau 5 – Nombre d’éléments structurels requis par unité de surface selon le type de croissance forestière.....	41
Tableau 6 – Principales couches de données issues la géodatabase d’El Pilar	51
Tableau 7 – Table attributaire de la couche « Unified Architecture »	53
Tableau 8 – Table attributaire de la couche « Individual Features ».....	53
Tableau 9 – Table attributaire de la couche « Group Association »	54
Tableau 10 – Table attributaire de la couche « GoTo_Concordance »	54
Tableau 11 – Tableau de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules avant la fusion des deux premières catégories.....	68
Tableau 12 – Tableau de croisement des données entre la longueur de la diagonale et la hauteur approximative des monticules après la fusion des deux premières catégories.....	68
Tableau 13 – Répartition des 53 arbres utilisés pour les anciens abris mayas au sein des différentes phases du cycle Milpa	72
Tableau 14 – Simulation des besoins en matériaux en fonction du temps de croissance des différents éléments structurels.....	76

Intégration de données de végétation pour l'analyse spatiale d'un site archéologique : la quantification des coûts en ressources naturelles des abris pour les anciens Mayas.

Mémoire d'Ingénieur E.S.G.T, Le Mans 2023

RÉSUMÉ

Dans la réserve archéologique d'El Pilar, qui abritait autrefois les anciens Mayas en Amérique centrale, environ 25% des espèces végétales sont considérées comme utiles dans la construction. Cette étude vise à quantifier les besoins en construction des maisons traditionnelles mayas, étant donné que le logement est un besoin fondamental de l'humanité. La question centrale est de savoir si les ressources naturelles disponibles, notamment les arbres pérennes, sont adéquates pour répondre à ces besoins en abris.

Grâce à l'utilisation de la technologie LiDAR, combinée à l'utilisation d'un SIG (Système d'Information Géographique) et du GPS, la végétation du site a été cartographiée et intégrée dans ArcGIS Pro, un logiciel SIG. Par la suite, ces données ont été traitées afin d'isoler et de quantifier les espèces végétales nécessaires dans le processus de construction de ces abris.

Mots clés : LiDAR, El Pilar, SIG, végétation, acquisition, intégration, quantification, culture Maya, forêt Maya.

SUMMARY

In the archaeological reserve of El Pilar, which once housed the ancient Mayans in Central America, approximately 25% of plant species are considered useful in construction. This study aims to quantify the construction needs of traditional Mayan houses, as housing is a fundamental human need. The central question is whether the available natural resources, particularly perennial trees, are sufficient to meet these shelter needs.

Using LiDAR technology, combined with a GIS (Geographic Information System) and GPS, the vegetation of the site has been mapped and integrated into ArcGIS Pro, a GIS software. Subsequently, this data has been processed to isolate and quantify the necessary plant species in the construction process of these shelters.

Keywords : LiDAR, El Pilar, GIS, vegetation, acquisition, integration, quantification, Mayan culture, Maya forest.