



HAL
open science

Seuils de détection des anciens sites de l'architecture Maya basés sur l'imagerie LiDAR : identification des sites sous la canopée

Gabriel Mordant

► **To cite this version:**

Gabriel Mordant. Seuils de détection des anciens sites de l'architecture Maya basés sur l'imagerie LiDAR : identification des sites sous la canopée. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01179392

HAL Id: dumas-01179392

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179392>

Submitted on 22 Jul 2015

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 METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Gabriel MORDANT

**Seuils de détection des anciens sites de l'architecture Maya basés sur
l'imagerie LiDAR, identification des sites sous la canopée**

Soutenu le 10 Juillet 2014

JURY

PRESIDENT :	Mr Rani EL MÉOUCHE	Enseignant à l'ESTP
MEMBRES :	Mme Joëlle DUROY	Professeur référent
	Mr Laurent POLIDORI	Professeur Cnam, Directeur de l'ESGT
	Mme Perrine Thébault	Membre du Jury

Remerciements

À Madame le Docteur Anabel FORD, ma maîtresse de stage, pour sa passion communicative, ses enseignements et sa patience.

À Monsieur Narcisso TORRES, le garde forestier d'El Pilar, pour tout ce qu'il m'a appris, tout ce dont il m'a protégé avec bonne humeur et efficacité.

À l'équipe de MARC et de BRASS : Andres, Becca, Carmen, Claudia, Connie, Hanna, Lisete, Maria, Monica et Tracy pour leur accueil chaleureux, leur convivialité et leur sympathie.

À Madame Joëlle DUROY, mon professeur référent, pour sa disponibilité, ses conseils et l'attention qu'elle a portée à mon travail.

À Madame Nathalie LE ROI, membre de l'administration de l'ESGT, pour son suivi régulier et son temps consacré à gérer les TFE.

À Juliette Lardilleux, qui a partagé cette expérience avec moi et m'a soutenu dans les moments de doute.

Enfin je remercie tout particulièrement mes parents sans qui tout ce projet et tant d'autres n'auraient jamais pu avoir lieu, pour leur soutien moral et les aides qu'ils m'ont apportés avec la plus grande patience et compréhension tout le long de mes études.

MERCI



Liste des abréviations

ASPRS : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

BM : Bone map

BRASS : Belize River Archaeological Settlement Survey

CdN : Courbes de Niveau

D : Dépressions

DNR : Departmental of Natural Resources

ESRI : Environmental Systems Research Institute

EXP : "Points d'exploration", identifiés sur les visualisations du LiDAR et inspectés sur le terrain afin de déterminer leur nature

GPS : Global positioning System

IMU : Inertiel Measurement Unit

IN : "Points invisibles", non identifiés sur les visualisations du LiDAR et découverts sur le terrain

LI : Labor Investment, nombre de jours estimé à la construction d'une structure Maya

LiDAR : Light Detection And Ranging

MARC : Meso-American Research Center

M : Monticules

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MNS : Modèle Numérique de Surface

N : Points naturels (peuvent être un arbre, des débris de végétaux...)

NCALM : National Center for Airbone Laser Mapping

PRU : Primary Residential Unit

PSSM : Perceptually Shaded Slope Map

SIG : Système d'Informations Géographiques

SIM : Solar Insolation Modeling

SMRF : Simple MoRphological Filter

SRU : Secondary Residential Unit

SVF : Sky View Factor

TFE : Travail de Fin d'Etudes

UCSB : University of California Santa Barbara

UCF : University of Central Florida

UTM : Universal Transverse Mercator

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations.....	3
Table des matières.....	5
I CONTEXTE	9
I.1 MARC /BRASS	9
I.2 EL PILAR.....	9
I.3 LEVE TOPOGRAPHIQUE TRADITIONNEL ET MODERNE EN ARCHEOLOGIE.....	10
I.4 LE LiDAR.....	11
I.4.1 PRESENTATION DE LA TECHNIQUE	11
I.4.2 CARACOL COMME PREMIERE EXPERIENCE DU LiDAR DANS LE MONDE MAYA	12
I.4.3 LE LiDAR A EL PILAR	13
I.4.3.a Présentation	13
I.4.3.b Répartition des points du LiDAR	14
I.5 LES SITES ARCHEOLOGIQUES SOUS LA CANOPEE	14
I.5.1 RECONNAISSANCE D'UN SITE.....	14
I.5.1.a Une unité de résidence	15
I.5.1.b Une carrière.....	15
I.5.1.c Une terrasse	15
I.5.1.d Une place ou plateforme.....	16
I.5.1.e Une dépression ou réservoir	16
I.5.1 DESCRIPTION DES FORMES DES SITES.....	16
I.5.2 DIFFERENTS TYPES D'UNITES DE RESIDENCE	17
I.6 CONCLUSIONS.....	18
II Protocole de détection.....	19
II.1 VISUALISATION DES DONNEES.....	19
II.1.1 TYPE DE VISUALISATION.....	19
II.1.2 RESOLUTION SPATIALE ET CAPACITE DE DETECTION	21
II.1.3 ANALYSE.....	21
II.1.3.a Etablissement d'un niveau de visibilité de site.....	21
II.1.3.b Comparaison des nombres de sites visibles.....	23
II.1.3.c Bone map et courbes de niveau comme images de base pour la détection.....	24
II.1.4 DENSITE DE POINTS DANS LA COUVERTURE VEGETALE ET AU SOL.....	24
II.1.4.a Calcul de la densité	24
II.1.4.b Répartition des points du laser dans chaque couche.....	25
II.1.4.c Densité de points de sol.....	26
II.2 DETECTION DES DIFFERENTES ENTITES DE L'ARCHITECTURE MAYA :	27
II.2.1 VISUALISATION DES SITES	27
II.2.1.a Visualisation des unités de résidence	27
II.2.1.b Visualisation des carrières.....	28
II.2.1.c Visualisation des dépressions	28
II.2.1.d Visualisation des terrasses.....	29
II.2.1.e Réalité du terrain	29

II.2.2	STRATEGIE DE LA DETECTION	30
II.2.2.a	Courbes de niveau	30
II.2.2.b	Bone map	30
II.2.2.b.1	Identification	30
II.2.2.b.2	Estimation d'un pourcentage d'attente sur les sites	31
II.2.3	COLLECTE DE DONNEES	32
II.2.3.a	Introduction	32
II.2.3.b	Situation du terrain et protocole	32
II.2.3.b.1	Transfert SIG - GPS	33
II.2.3.b.2	Exploration totale de la zone	33
II.2.3.b.3	Fiches de terrain	33
II.2.3.c	Expérience du terrain	34
II.2.3.d	Traitement des données	35
III	Analyses	36
III.1	INTRODUCTION	36
III.2	ANALYSES	36
III.2.1	ANALYSE DES RESULTATS DE L'EXPLORATION	36
III.2.1.a	Présentation des résultats	36
III.2.1.b	Limite à la détection	37
III.2.2	CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES ENTITES	38
III.2.2.a	Caractéristiques des unités de résidence	39
III.2.2.a.1	Raison de la visibilité de monticules de faible dimension	39
III.2.2.a.2	Raison de la visibilité de monticules de faible densité de point de sol	40
III.2.2.b	Caractéristiques des autres sites culturels	41
III.2.2.c	Caractéristiques des sites invisibles	41
III.2.2.d	Récapitulatif des résultats de l'exploration	42
III.2.3	POURCENTAGE D'ATTENTE :	43
III.2.4	L'AVENIR DE LA DETECTION POUR MARC	44
III.3	UNITES DE RESIDENCE ET INVESTISSEMENT DE TRAVAIL	45
III.4	CONCLUSIONS	47
	Conclusion personnelle	48
	Bibliographie	49
	Liste des illustrations	51
	Liste des tableaux	52
	Table des annexes	53

INTRODUCTION

Le monde ignorait l'existence des Mayas jusqu'il y a presque deux cents ans. Peu après la conquête espagnole, les prêtres européens avaient détruit la grande majorité des codex laissés par les Mayas, les jugeant de l'œuvre du diable. Pourtant cette civilisation fut l'une des plus avancées au monde. Evoluant depuis près de 4000 ans, et se développant du Yucatan (Mexique) jusqu'à l'ouest du Salvador, les Mayas maîtrisaient à merveille beaucoup de domaines tels que l'astronomie, l'agriculture, l'architecture, l'art et même la littérature. Ils étaient structurés en cités autonomes, dirigés par des rois. Les cités les plus importantes étaient Tikal Calakmul (3^e – 9^e siècle) et Chichén Itzá (10^e – 11^e siècle).

La forêt tropicale Maya qui a émergé il y a environ 8 000 ans a protégé tous ces incroyables sites de leur érosion. Les mésoaméricains avaient basé leurs stratégies agricoles sur les plantes indigènes et l'adaptation au climat local et avaient développé leur système alimentaire sans bétail. Cette relation au paysage fait partie intégrante du développement de la civilisation Maya. La persistance de la forêt est possible grâce aux anciennes pratiques Mayas qui perdurent encore aujourd'hui.

Mais ce qui a conservé ces monuments pendant toutes ces années est ce qui nous empêche aujourd'hui de les détecter : visibilité limitée, inaccessibilité à certains secteurs, difficulté (voire impossibilité) de repérer les vestiges totalement enfouis, difficulté à cartographier les sites, etc. (Georges-Leroy et al., 2010). Une toute nouvelle technologie qui monte considérablement en puissance permet de pallier certaines de ces contraintes : Le LiDAR (Light Detection And Ranging) ; Celui-ci a démontré ses atouts dans de nombreux domaines topographiques et notamment en archéologie.

Pour comprendre l'occupation du sol par les Mayas et leur mode de vie, il est primordial de localiser ces vestiges. La situation des habitations, des temples, des réservoirs d'eau et de nourriture permet de comprendre l'organisation des cités de cette civilisation. Le centre de recherche MesoAméricain (MARC) étudie depuis de nombreuses années le mode de vie des Mayas, leur occupation du territoire et leur agriculture. Sous la direction d'Anabel Ford, il se concentre sur la réserve d'El Pilar (cf. Illustration 1), à proximité du célèbre site Tikal et à cheval entre la frontière du Belize et du Guatemala.

Ce laboratoire s'est lui-même intéressé à la technologie du LiDAR et en Mai 2012, un hélicoptère a survolé et effectué des relevés sur toute la zone. Ces mesures ont permis d'obtenir plusieurs types de visualisation à partir de différents algorithmes. Elles représentent la surface du sol et permettent de détecter avec plus ou moins d'aisance certains vestiges archéologiques. Bien que ces visualisations permettent la visibilité de ces sites, il s'est avéré que certains de ces sites ne le soient pas. Il est donc légitime de se demander quels sont les facteurs qui caractérisent cette visualisation et quelle est la capacité du LiDAR dans la détection des vestiges.



Illustration 1 – Carte de situation de la réserve d'El Pilar
Source : National Geographic, Esri (Environmental Systems Research Institute)

Afin de tenter de répondre à ces questions, les études seront menées selon une certaine organisation :

- ❖ Tout d'abord nous présenterons le contexte de ce travail : le laboratoire MARC, la réserve d'El Pilar, le levé topographique traditionnel en archéologie, le LiDAR et les types de vestiges que nous cherchons à détecter.
- ❖ Ensuite, nous détaillerons le LiDAR avec tout d'abord une introduction sur la première expérience dans le monde Maya à Caracol, puis nous nous concentrerons sur celui d'El Pilar et étudierons les différentes visualisations à disposition et données qu'il nous transmet.
- ❖ Le troisième temps consistera au protocole de détection des vestiges archéologiques avec la description de la visualisation des sites connus, de l'identification de nouveaux sites présumés et enfin la présentation de la phase d'exploration sur le terrain.
- ❖ Finalement, à partir des résultats fournis par l'expérience du terrain, nous effectuerons des analyses sur les caractéristiques des sites visibles et non visibles, les facteurs qui entrent en jeu dans la visibilité et la capacité du LiDAR dans la détection.

Ces études s'effectueront en parallèle du travail de recherche de Juliette Lardilleux qui se concentre sur la mise en place d'un protocole pour le relevé des vestiges archéologiques. Ses études permettront d'intégrer les données SIG (Système d'Informations Géographiques) au GPS (Global positioning System), donc d'associer les données bureau au terrain et vice-versa. Mais aussi de définir des critères formels au relevé topographique et à la représentation cartographique.

I CONTEXTE

I.1 MARC /BRASS

MARC (Meso-American Research Center) est un laboratoire situé à l'université de Californie de Santa Barbara (UCSB). Il effectue toutes sortes de recherches dans le contexte de l'anthropologie et de l'archéologie dans la région américaine du Mexique et d'Amérique. Il met l'accent aujourd'hui sur la forêt Maya et les grands domaines d'études dans la région.

Le Dr Anabel Ford en est le directeur général et dirige une équipe de plusieurs bénévoles qui viennent apporter leur contribution quelques heures dans la semaine. Ce laboratoire fonctionne ainsi depuis de longues années, on peut y voir l'impact sur l'organisation des données. En effet, beaucoup de personnes ont effectué du travail très intéressant et peut être essentiel pour le projet mais sans classer les données ou les nommer correctement. Le résultat est un amas de données, faisant qu'ainsi un grand nombre d'informations ont été perdues ou mal répertoriées. L'importance des métadonnées est capitale dans n'importe quel type d'infrastructure et surtout dans celle où de nombreuses personnes de différentes qualifications travaillent sur un même projet. Le premier gros travail a donc été de classer, trier et corriger les données SIG à disposition et de nommer leurs métadonnées afin de laisser une organisation claire et concise pour l'avenir. Cette étape était nécessaire et permettra un gain de temps considérable pour les gens qui seront amenés à travailler au laboratoire.

Le projet BRASS (Belize River Archaeological Settlement Survey) a été lancé en 1983 par le Dr Anabel Ford dans la ville de San Ignacio au Belize. Ce projet en accord avec MARC a été conçu pour examiner de près les relations entre les sites archéologiques et l'environnement naturel et leur répartition spatiale. Il est la base du travail de terrain.

I.2 El Pilar

El Pilar a plus d'une douzaine de grandes pyramides dans une superficie d'une vingtaine de kilomètres carrés. Il est le plus grand centre de la région Belize River, plus de trois fois la taille des autres cités aux alentours bien connues telles que Xunantunich. Le site est divisé en trois secteurs principaux (cf. illustration 2) : El Pilar Xaman (au Nord), El Pilar Nohol (au Sud), et El Pilar Poniente (à l'Ouest) (marc.ucsb.edu). La région porte depuis longtemps le nom d'El Pilar mais l'origine de ce nom est obscure, il viendrait des nombreuses sources d'eau naturelles. Deux cours d'eau locaux ont leurs origines à El Pilar, un à l'est « El Pilar Creek », et un à l'ouest « El

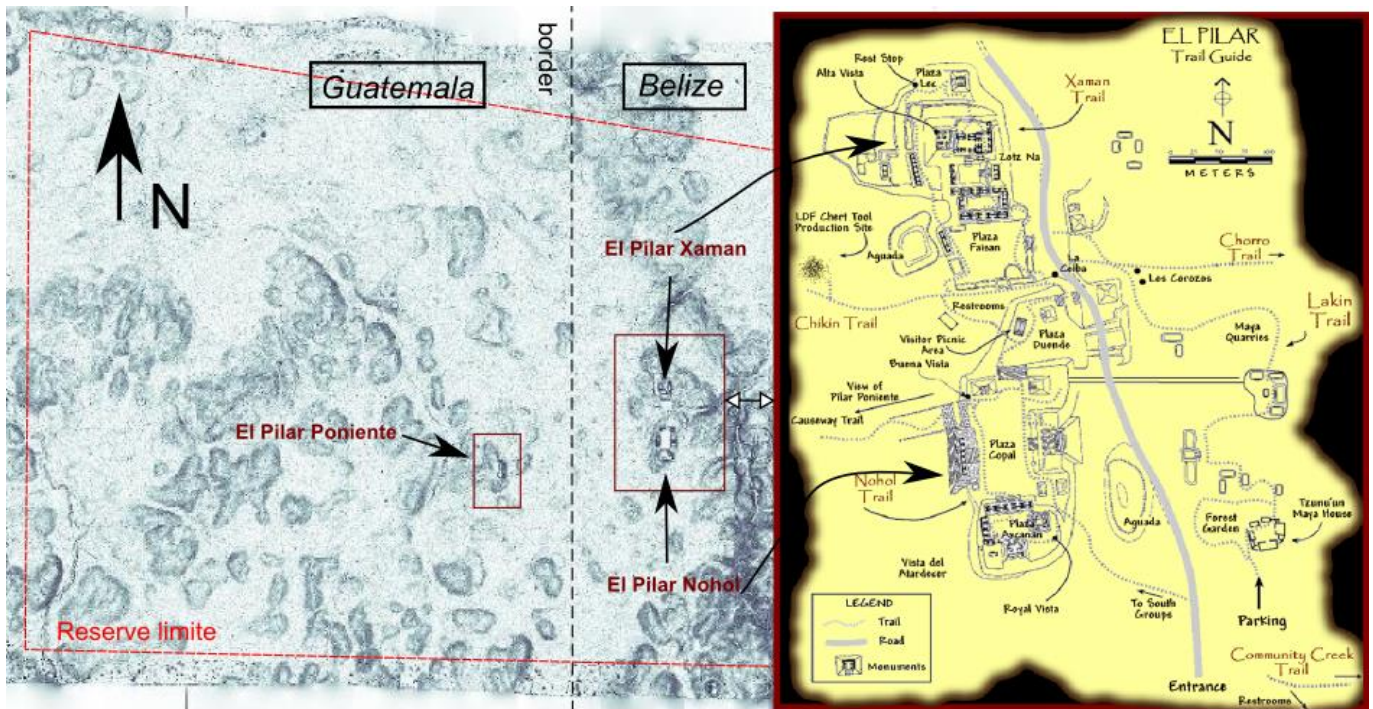


Illustration 2 - Description de la réserve d'El Pilar

Source : MARC

Manantial ». L'abondance de l'eau de cette région est rare dans la région Maya ; la cité de Tikal par exemple (à seulement 50 km à l'ouest) n'avait aucune source d'eau naturelle.

Les ruines d'El Pilar d'aujourd'hui montrent qu'il était autrefois le centre de l'administration principale de la zone Belize River, fortement peuplé. Des temples et des palais y ont été construits pendant près de 15 siècles, à partir de 500 avant JC jusqu'à 1000 après JC. Le principal objectif des études sur cette région est de comprendre le fonctionnement de cette société antique développée, ses relations sociales, son environnement et son approvisionnement en ressources. C'est le passé qui va éclairer le présent et préparer un chemin pour l'avenir.

I.3 Levé topographique traditionnel et moderne en archéologie

El Pilar était inconnu au niveau archéologique avant les années 1980 et les enquêtes du projet BRASS (MARC). Le Dr Anabel Ford a réalisé la première cartographie de ce site et l'a donc officialisé et partagé avec le monde entier. Ses explications et discussions à ce sujet nous ont montré que ce premier relevé a identifié et répertorié de nombreux sites résidentiels. Il a également confirmé l'emplacement des centres, et a permis de recueillir beaucoup d'informations sur la nature des sols, la topographie et la végétation. Les phases terrain ont commencé en 1983, continuent aujourd'hui et se prolongeront dans l'avenir.

Au début, les phases d'exploration étaient entreprises dans des sections potentiellement intéressantes, dans des zones estimées adéquates au type de vie des anciens Mayas (en fonction de l'hydrologie, topographie du terrain...). Des lignes de bases étaient définies, et étaient l'origine

des explorations et des mesures effectuées. Ensuite lorsque des sites étaient découverts, leurs mesures étaient réalisées au croquis et distancemètre. Les relevés des sites plus importants comme Tikal se sont réalisés à l'aide d'un goniographe (cf. illustration 3), nous avons eu le privilège de rencontrer Robert Car, qui a réalisé le plan de cette extraordinaire cité Maya avec cet outil. Il nous a présenté les plans réalisés et sa méthode de travail. La particularité du goniographe est la réalisation du dessin simultanément au levé, en fonction des mesures d'angles et de distance (à l'aide des fils stadimétriques).

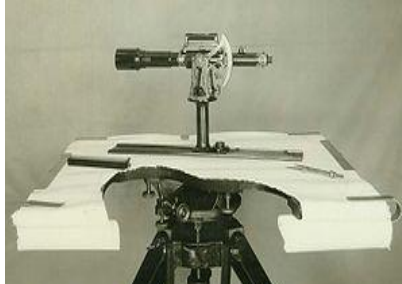


Illustration 3 - Le Goniographe
(source : NOAA's Historic Coast & Geodetic Survey)

Ces méthodes traditionnelles prenaient un temps considérable et ne permettaient de cartographier que les zones considérées potentiellement intéressantes sur certains types de facteur (tels que l'hydrologie, l'environnement). Aujourd'hui, les techniques ont évolué mais le plan topographique produit reste approximativement équivalent (avec un gain de temps considérable). La plupart des relevés s'effectuent de nos jours au GPS et, pour les archéologues qui parviennent à s'en équiper, au LiDAR. Cependant, le LiDAR n'est pas une technique autosuffisante pour effectuer des plans, le GPS est dans tous les cas indispensable afin de s'assurer que les sites potentiellement identifiés soient réels. Car la difficulté dans cette détection est de distinguer le faux du vrai, l'artificiel du naturel. Le LiDAR permet en plus de la détection de site, d'écourter le temps et les efforts dans l'exploration de la jungle en ne se limitant qu'aux points potentiels préalablement identifiés.

Le GPS, sous cette épaisse végétation parvient malgré tout à obtenir une précision minimale de dix mètres. Les études menées par Lardilleux (2014) montrent qu'en fonction des divers types de végétation, dense, moyenne et ouverte, la précision est respectivement de 3 m, 6 m et 10 m. Cette précision sera évidemment à prendre en compte lors des phases d'exploration car il faudra en effet parcourir les alentours du point indiqué par le GPS pour trouver le point réellement défini par les visualisations du LiDAR.

I.4 Le LiDAR

I.4.1 Présentation de la technique

Le LiDAR aéroporté est une technique révolutionnaire dans les mesures des sites archéologiques et surtout dans les environnements difficiles tels que la jungle tropicale. En effet, la gigantesque quantité d'informations émises lors du survol permet de traverser l'épaisse canopée végétale de la zone. Le LiDAR utilise le rayonnement laser et effectue un balayage à très grande fréquence et collecte des informations en trois dimensions sur les points. Ce système se décompose en un système de positionnement par satellites (GPS), un système inertiel IMU

(Inertiel Measurement Unit), un balayeur laser et un ordinateur de bord. Le GPS et le système IMU permette de déterminer précisément la position lors de l'émission des données et de ce fait la position des points récoltés. Le balayeur laser permet la capture du nuage de points à très haute densité et l'ordinateur de bord, l'enregistrement de toutes les données décrites.

Le faisceau lumineux renvoie une information sur le premier point qu'il touche (une branche, un oiseau, le sol...), la quantité de mesures joue donc un rôle évident dans la modélisation du sol (sachant qu'environ 98% des points envoyés par le système sont interceptés par la biomasse). Il permet un gain de temps incroyable et une précision remarquable.

La modélisation du sol par le LiDAR permet d'avoir la topographie de la totalité de la zone, de détecter un grand nombre de sites et ainsi de considérablement réduire le temps d'investigation. Explorer les plus de 20 km² à pied de la réserve d'El Pilar serait très laborieux. A titre d'exemple, une exploration totale de la zone avec un quadrillage tous les 30 m (pour répondre aux contraintes de visibilité d'à peu près 15 m dans la forêt), et sachant que la réserve mesure environ 6000 m x 8000 m, signifierait qu'il faudrait parcourir et dégager à la machette plus de 1 600 km à pied afin d'explorer la totalité de la zone. Les attraits du LiDAR sont donc clairement intéressants.

I.4.2 Caracol comme première expérience du LiDAR dans le monde maya

Chase et al. (2011 et 2013) décrivent la première application à grande échelle de LiDAR aéroporté en Méso-Amérique. Celle-ci a été entreprise sur la cité Maya de Caracol (cf. illustration 4) en Avril 2009, grâce au financement de la NASA et de l'UCF (University of Central Florida). Une zone de 200 km² a été survolée par le centre national de cartographie laser aéroporté (NCALM). Le produit obtenu était un modèle numérique de terrain (surnommé « bare earth ») qui permettait pour la première fois la pleine visualisation et mesure d'une ancienne ville Maya en termes de paysage. L'analyse de LiDAR a démontré que la superficie de la ville était de plus de 180 km². Le LiDAR a permis de détecter de nombreuses structures et de groupes résidentiels individuels dans la majorité sur terrain plat.



Illustration 4 – Situation de la cité Maya Caracol

Il a permis d'analyser l'organisation de cette cité et de démontrer le caractère anthropique de ce paysage, mais également d'identifier deux grottes et de nombreux réservoirs. Ces données ont permis d'étudier la gestion et la maîtrise de l'eau de cette civilisation et de voir par exemple que chaque groupe résidentiel était indépendant et gérait sa propre source d'eau.

L'application réussie de LiDAR à Caracol a eu un impact majeur sur l'archéologie méso-américaine, elle a contribué à démontrer l'ampleur et la complexité de l'ancienne ville Maya et comprendre l'organisation du paysage. En fournissant une vue d'ensemble de la cité, les données LiDAR changent à jamais la façon dont les sites mésoaméricains peuvent être cartographiés et enregistrés, et amène à des interprétations plus complètes et plus détaillées sur les relations entre l'homme et la nature.

Les recherches effectuées sur le site de Caracol ont donc donné beaucoup de satisfactions mais n'ont pas parlé des caractéristiques des sites visibles et invisibles, ni des facteurs influant sur la détection. La visualisation des vestiges peut être évidente comme elle peut être confuse, il est important de savoir ce qui est clairement identifiable, ce qui l'est moins et ce qui ne l'est clairement pas. En plus de cela, il sera également intéressant de voir si cette détection n'est pas perturbée par certains facteurs. Cette étude permettra à l'avenir de savoir interpréter les données du LiDAR en milieu tropical.

I.4.3 Le LiDAR à El Pilar

I.4.3.a Présentation

La réserve d'El Pilar de 22 km² a été survolée en 26 bandes par la société canadienne «Airborne Imaging» dans un modèle quadrillé à une élévation de 330 m au-dessus de l'espace. Le capteur, un LEICA ALS50, permet l'acquisition d'environ 19 points par mètre carré. Il est d'une précision estimée, d'après les caractéristiques de vol et de calibration, de 45 cm en planimétrie et de 30 cm en altimétrie¹. Celles-ci sont largement suffisantes pour la production d'une carte de représentation générale des sites qui requiert une précision d'une dizaine de mètres sur l'échelle de la réserve.

Le principal avantage du LiDAR est sa quantité de points envoyée 581 millions de points sur nos 22 km². Cette quantité doit maintenant traverser la canopée, la sous-végétation et atteindre le sol. Les profils suivants (cf. illustration 5), l'un effectué sur les points LiDAR brut et l'autre sur l'orthophoto montrent l'ampleur de la végétation. Les profils sont effectués sur le plus gros site de la réserve : plaza copal. Ce site est invisible sur l'orthophoto, contrairement au LiDAR qui lui parvient à traverser cette épaisse couche de végétation (qui peut mesurer une dizaine à une

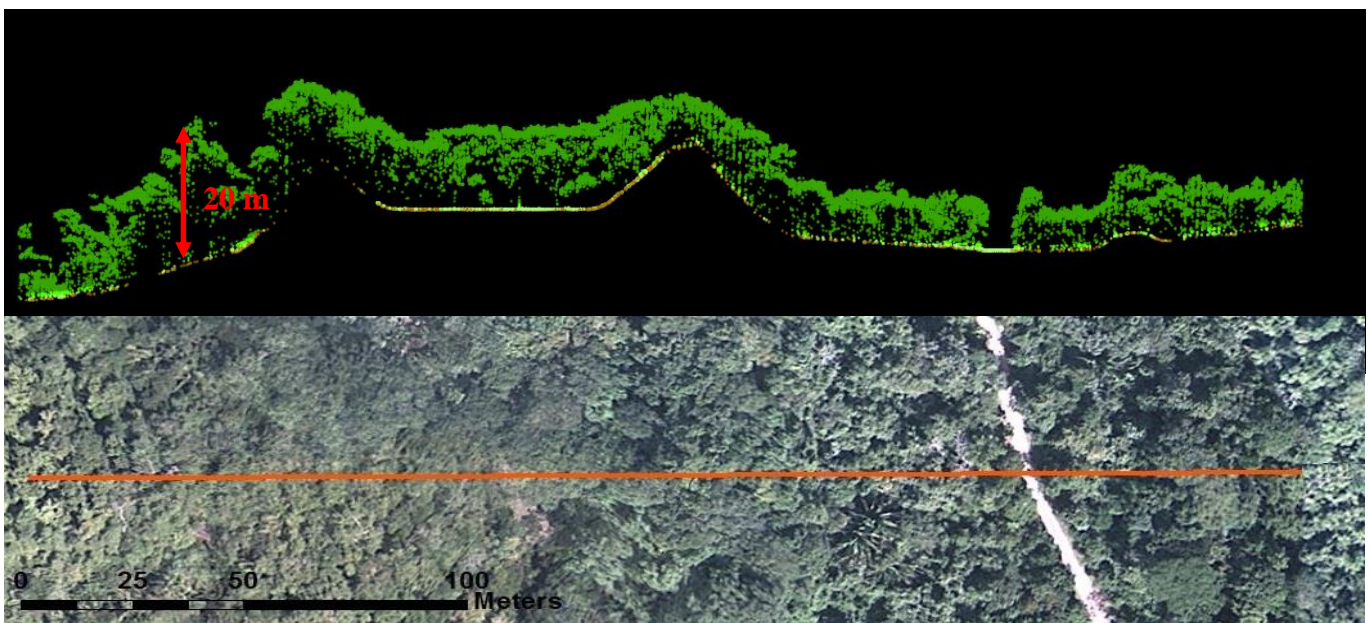


Illustration 5 - Coupes de la place Copal sur le LidAR et orthophoto

¹ Annexe 1 : LIDAR PROJECT SUMMARY

trentaine de mètres) et capter quelques points de sol, suffisants pour réaliser un modèle numérique de terrain et distinguer les deux grands temples de la place.

Les données LiDAR brutes sont sous la forme d'un fichier « .las » pris en compte par Arcgis. Ce type de format de structure binaire a été créé par l'ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing). Il contient plus d'informations et peut être lu plus efficacement par l'outil d'importation que son prédécesseur ASCII (American Standard Code for Information Interchange). La quantité d'informations peut vite devenir très longue à traiter informatiquement et requiert une certaine puissance.

I.4.3.b Répartition des points du LiDAR

Le tableau 1 montre la répartition des points dans chaque couche :

Classe	Nombre de Points	Pourcentage
Ground	13 468 333	2.32
Low Veg	20 157 143	3.46
Med Veg	15 540 573	2.67
High Veg	532 588 195	91.55
Total	581 754 244	100

Tableau 1 - Récapitulatif du nombre de points dans chaque couche

La différence entre le nombre de points de sol et de végétation est considérable. 13 millions de points atteignent le sol contre 569 millions dans la végétation. Seulement 2% de la totalité des points atteignent donc le sol en moyenne sur la surface de la réserve. Sachant que la création des rasters, permettant la visualisation des sites, est uniquement basée sur cette couche, il est nécessaire de prendre en compte cette donnée pour estimer la valeur de l'information obtenue par les rasters. La couverture végétale est comme il était prévisible, un des principaux obstacles à la détection, elle retient presque 98% des points.

I.5 Les sites archéologiques sous la canopée

I.5.1 Reconnaissance d'un site

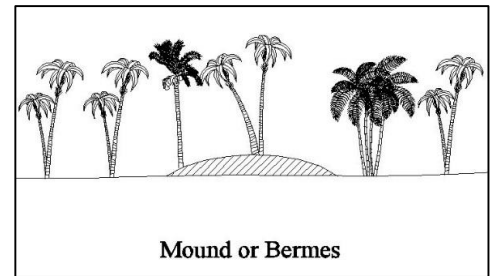
Les sites archéologiques, surnommés « culturels », présents dans notre zone peuvent être de divers types, même si ils ne sont pas toujours clairement identifiables. Ils sont tout d'abord, soit artificiels donc construits par l'homme, soit naturels mais à l'usage de l'homme. La plupart d'entre eux ont été recouverts par la nature et la végétation. Ils sont donc enfouis sous des tas de terre, envahis par des arbres, par la forêt... Ces sites sont difficiles à reconnaître sur le terrain, si vous n'en aviez jamais vu, vous passeriez à côté en pensant que ce n'est qu'un simple tas de terre.

Ils se définissent par des unités de résidence, des carrières, des terrasses, des places et enfin des dépressions.

I.5.1.a Une unité de résidence

En général, elle est sous la forme d'un monticule de terre (cf illustrations 6) mesurant de 30 cm à 3 ou 4 m qui surplombe les vestiges enfouis. Il pouvait être à l'époque un bâtiment à usage de dortoir, de salle de réception, de cuisine, de réserve de nourriture ou encore de temple. Ces entités peuvent être de différentes grandeurs en fonction de leur importance et du niveau de leur effondrement et peuvent être également composées de plusieurs structures. On distingue les unités de résidence primaire et les unités de résidence secondaire (cf I.5.2). Les bâtiments de plus grosse dimension étaient ceux de réception des invités. Les Mayas n'accordaient pas trop d'importance à leur chambre, ils passaient la plupart de leur temps à l'extérieur.

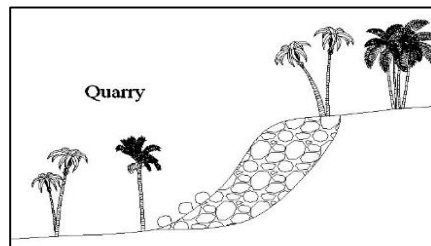
Ces sites sont les plus importants à détecter, connaître leurs lieux de résidences et de vie est primordial pour analyser l'organisation du territoire Maya. Ils sont pour la plupart de formes polygonales.



Illustrations 6- Photographie et schéma d'un monticule
Source photographie : John Pascoe

I.5.1.b Une carrière

Les carrières (cf. illustrations 7) étaient leur source d'approvisionnement en pierres et matériaux afin de construire leurs édifices mais aussi leurs outils (silex, haches, couteaux...). De formes linéaires, on peut encore voir les traces du travail de l'homme sous la forme de gros rochers travaillés.



Illustrations 7 – Photographie et schéma d'une carrière
Source photographie : El Pilar blogspot

I.5.1.c Une terrasse

Les terrasses (cf. illustration 8) sont présentes dans les zones pentues et permettent d'aplanir le terrain. Elles peuvent mesurer de 30 cm à plusieurs mètres en hauteur et de quelques mètres à une centaine de long. Elles étaient utilisées dans l'agriculture pour lutter contre l'érosion des sols et permettre l'irrigation par inondation. Elles permettent également d'augmenter la surface cultivable dans des milieux pentus, et de mieux conserver l'eau.

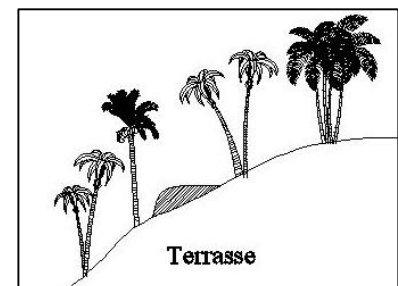


Illustration 8- Schéma d'une terrasse

I.5.1.d Une place ou plateforme

La fonction de la place (cf. illustration 9) est d'aplanir le terrain et de supporter les constructions. Elle était un signe de richesse et donnait un style à leur architecture. Elle est généralement présente pour des constructions importantes, pouvant comporter de nombreux monticules.

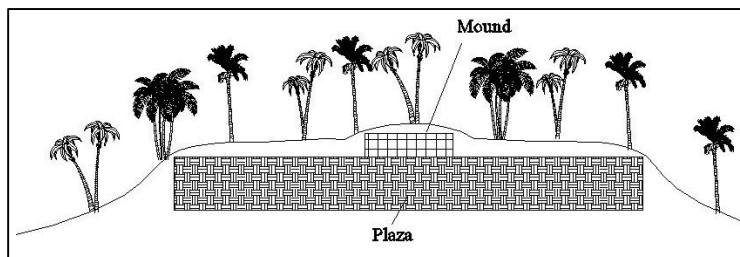
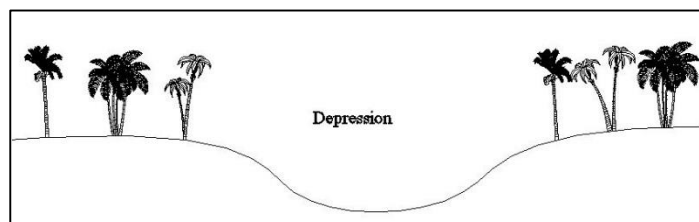


Illustration 9 - Schéma d'une plateforme

I.5.1.e Une dépression ou réservoir

De forme généralement rectangulaire, la dépression (cf. illustrations 10), ou aguada en espagnol, est une réserve d'eau. Les Mayas s'en servaient pour capter et stocker les eaux de pluie. Ce procédé est encore très utilisé dans toute l'Amérique centrale. Il est donc parfois difficile de différencier les dépressions culturelles, faites par les Mayas, de celles construites plus récemment car à la différence des autres éléments, celles-ci ne présentent pas toujours de pierres témoignant la présence de vestiges.



Illustrations 10 – Photographie et schéma d'une dépression. Source Photographie : proteus.brown.edu

I.5.1 Description des formes des sites

Le tableau 2 suivant présente les différentes formes caractéristiques des sites d'intérêt. Ces valeurs sont données à titre indicatif, elles ne sont pas obligatoirement respectées sur le terrain mais donnent une idée générale.

Caractéristiques	Linéaires	Polygonales	Platitude	Hauteur	Dimensions
Monticules		X	X	30 cm < 5 m	>3 m
Carrières	X			60 cm < 3 m	>2 m
Terrasses	X		X	30 cm < 3 m	>1 m
Places		X	X	30 cm < 5 m	>5 m
Dépressions		X	X	30 cm < 3 m (profondeur)	>3 m

Tableau 2 – Description des formes des sites

Les dimensions globales de ces sites sont à peu près équivalentes. Les places sont légèrement plus grandes car elles englobent les monticules, unités de résidence. Les différences sont dans la forme des structures de types linéaires (terrasses et carrières) ou polygonales (monticules, dépressions et places).

Certains sites précédemment décrits tels que des carrières ou des dépressions ont été construits après l'ère Maya classique, surnommés « historiques ». Ils n'ont donc pas d'intérêt archéologique mais il est important de les identifier sur les cartes pour éviter de les interpréter comme point d'intérêt par la suite et de perdre du temps à les explorer de nouveau.

I.5.2 Différents types d'unités de résidence

Un modèle d'implantation des sites Mayas a été réalisé en 2007 afin de mieux définir les types de sites et de pouvoir par la suite comprendre leur utilisation du territoire (FORD – CLARKE, 2007). La classification des sites Mayas s'effectue sur différents critères tels que la taille du site, sa composition (nombre de structures), sa position et son investissement de travail (LI, labor investment) qui estime le nombre de jours effectifs nécessaires à la construction du site. Deux types de résidence ont été répertoriés, PRU (primary residential unit) qui se définit par un LI de plus de 500 jours de travail et SRU (secondary residential unit) par moins de 500 jours.

Les PRU (cf. illustration 11) se définissent par une utilisation permanente contrairement aux résidences secondaires qui ne le sont que partiellement et ont des fins agricoles. Les mesures réalisées à l'époque ont révélé que les PRU étaient en moyenne composé de 2.5 structures par unité et que la diagonale de leur place mesurait 24 m. Ils composent 41% des unités de résidence pour une couverture de 73% de la surface construite. Les études anthropologiques ont estimé qu'à peu près 5 personnes en moyenne vivaient dans des unités primaires, ce qui amène à une densité d'habitants d'approximativement 140 personnes par km² dans la zone d'El Pilar.

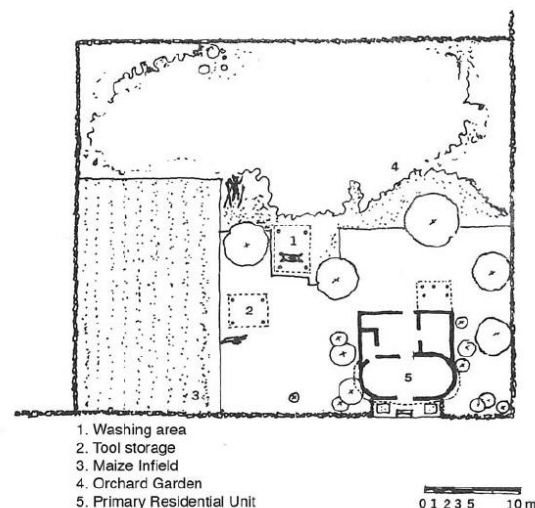


Illustration 11 - Représentation d'une aire de résidence primaire et de ses potagers
Source : MARC

Une unité de résidence secondaire, quant à elle se définit par une structure unique, en général, isolée des zones habitées et avec une longueur moyenne de 9 m. Elles composent 59% des unités de résidence mais ne couvrent que 27% de la surface construite totale.

I.6 Conclusions

Ces vestiges archéologiques sont ceux que nous cherchons à détecter à partir des données LiDAR. Ils ont des formes et des tailles différentes, linéaires pour les terrasses et carrières et polygonales pour les monticules et dépressions. Le niveau de visibilité de ces sites sera certainement conséquent à ce type de forme et surtout à la dimension de ces sites qui doit varier sur l'ensemble de la zone.

Certains types de sites ont également un niveau d'importance différent en fonction de leur utilisation, une unité de résidence est par exemple plus importante à détecter qu'une carrière car les Mayas y passaient sûrement plus de temps. Ainsi il sera plus probable de trouver des artefacts ou objets Mayas dans ces lieux. Outre cela, ces unités étant le centre de vie de ces hommes, la répartition des SRU se trouvent généralement dans leurs alentours. La détection des vestiges sera donc plus poussée pour ces unités de résidence.

Après avoir présenté les entités Mayas qui nous intéressent et le contexte général, nous allons maintenant étudier les visualisations produites par le LiDAR afin de tenter une détection.

II Protocole de détection

II.1 Visualisation des données

La visualisation des données du LiDAR est la base de la détection. Elle était le sujet principal du TFE d'Hugo Bihr de 2013 (BIHR, 2013). Il en a conclu que les meilleures visualisations pour la détection de vestige sous la canopée étaient les images produites à partir d'algorithme SIM (Solar Insolation Modeling) et SVF (Sky View Factor). Une autre image créée par Thomas Pingel (PINGEL, 2013), un chercheur de l'UCSB, a été ensuite acquise par le laboratoire MARC et s'est avérée particulièrement intéressante.

Lors du début de mes recherches, je voulais essayer de trouver de nouveaux types de visualisations permettant d'augmenter les chances de détection. En effet chaque méthode permet de distinguer des choses que les autres ne peuvent pas forcément voir. J'ai donc pensé à réaliser un raster de l'intensité des points de sol du LiDAR et qui pourrait permettre de détecter les pierres constituant les vestiges archéologiques. Mais la réalité du terrain est complètement différente, ces ruines sont principalement composées de terres et recouvertes par la végétation. Seuls deux ou trois pierres de la taille d'une brique surplombent les monticules. Le raster d'intensité n'a donc pas été fructifiant. Hugo Bihr avait concentré ses études sur la visualisation par raster, mais d'autres moyens peuvent apporter une manière différente de visualiser et ainsi d'accroître la détection. J'ai donc également pensé à réaliser des Courbes de niveau (CdN) afin d'étudier leur intérêt. Mais le laboratoire MARC ayant passé beaucoup de temps à réaliser des visualisations à partir des données LiDAR, il ne souhaitait plus perdre trop de temps à essayer d'améliorer ces visualisations mais plutôt à se consacrer à ce que l'on peut en tirer. Le premier objectif sera donc de définir les meilleures visualisations à disposition.

II.1.1 Types de visualisation

Quatre principaux types de visualisation sont donc à étudier : La Bone Map de Thomas Pingel, les rasters produits par raster SIM et SVF d'Hugo Bihr et les courbes de niveau de 50 cm. Regardons d'abord la nature de ces visualisations et ce qu'elles représentent.

- La Bone Map² (BM) est un raster créé par Thomas Pingel, chercheur à l'université de Californie, correspondant à une visualisation PSSM (perceptually shaded slope map). Elle est le résultat de l'application d'un filtre de pente cognitif à un MNT ou MNS, lui-même ayant déjà subi un algorithme SMRF (Simple MoRphological Filter) triant les points par morphologie progressive. L'image résultante est une visualisation basée sur l'inclinaison des pentes, plus la surface est inclinée moins le pixel est lumineux et inversement (Pingel 2013).
- ✓ SIM³ 7*7 1.25 m (Solar Insolation Modeling) est une représentation par niveau de gris correspondant à la quantité de lumière reçue par une surface élémentaire. Le rayonnement peut être aussi bien global que diffus (kokalj 2011). La

² Annexe 2 : Bone Map

³ Annexe 3 : Visualisation SIM

visualisation SIM à disposition a été l'une des meilleures réalisations d'Hugo Bihl (2013).

- ✓ Également l'une des meilleures images réalisées par Hugo Bihl (2013), la visualisation SVF⁴ (Sky view factor) représente la partie de ciel visible depuis un certain point (cf. illustration 12). Les endroits voyant une plus grande partie du ciel sont plus brillants que ceux qui n'en voient qu'une petite (Kokalj 2012).

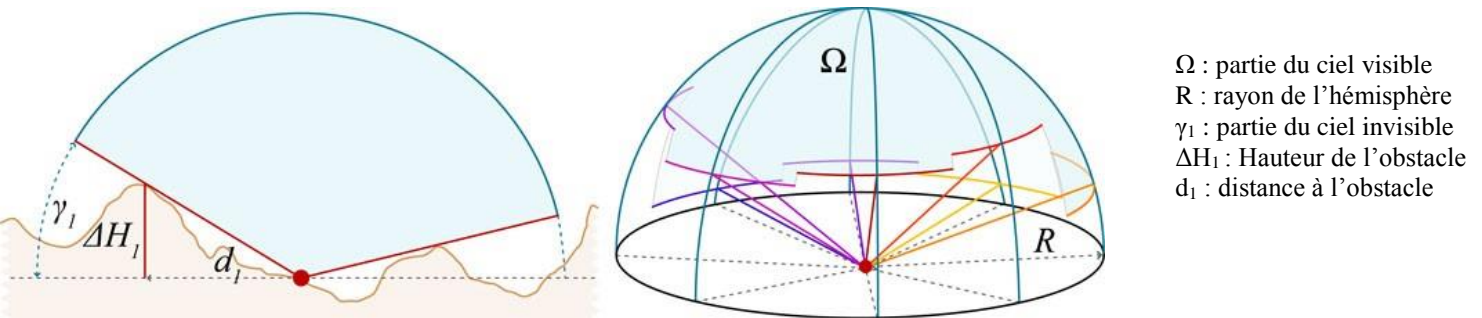


Illustration 12 - Schémas du SVF (Source : Kokalj 2012)

- ✓ Les courbes de niveau⁵ (CdN) 0.50 m : La création de ces courbes de niveau a été réalisée à l'aide de l'interface ArcGis et à partir des données LiDAR à disposition. Elles n'étaient utilisées à la base qu'à titre informatif pour connaître le type d'élévation des éléments (dépression ou monticule) car en effet les visualisations précédentes ne permettent pas de faire la distinction entre les élévations et les profondeurs. Mais il s'est avéré par la suite qu'elles montraient un aspect différent des rasters à disposition. Un autre point de vue, comme je le disais plus haut, est toujours intéressant car il permet de voir des éléments que les autres ne détectent pas. Sa visualisation a donc été prise en compte dans ce travail de recherche.

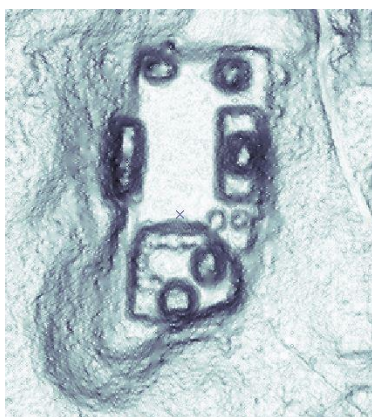


Illustration 13 - Capture d'écran de la BM

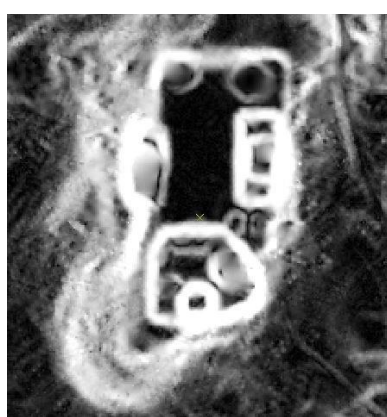


Illustration 14 - Capture d'écran visualisation SIM

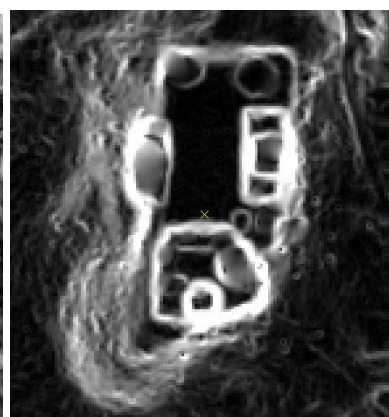


Illustration 15 - Capture d'écran visualisation SVF

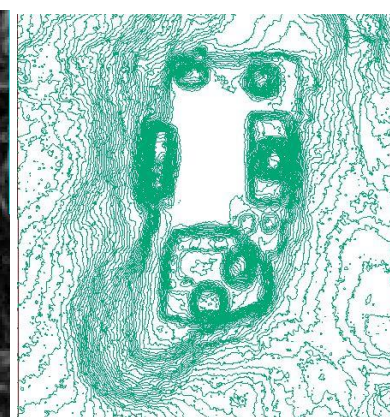


Illustration 16 - Capture d'écran des CdN

⁴ Annexe 4 : Visualisation SVF

⁵ Annexe 5 : Courbes de niveau

Ces quatre captures d'écran (cf. illustrations 13 à 16) représentent le site de la plaza Copal, le plus grand de la réserve d'El Pilar. Les détails sont plus ou moins visibles dans chacun de ces rasters. La bone map offre une représentation mieux définie. On y observe très clairement la route longeant le site à l'est et les deux monticules composant la structure Sud. Les autres rasters semblent être moins détaillés. Les courbes de niveau à droite offrent une bonne représentation, on y observe clairement toutes les structures de la place même si la visualisation de la route est difficile. Ces dernières pourraient donc être une bonne source de détection des sites ponctuels à l'inverse des entités linéaires.

Ces visualisations montrent toutes des aspects intéressants dans la détection d'entités sous la canopée. Il est nécessaire de les analyser et de les comparer afin de ne se concentrer que sur les essentielles. En effet, nous pouvons déjà penser lorsque nous observons ces différentes cartes que la BM, les images produites par algorithme SVF et SIM présentent des similarités dans la visualisation et que peut être une seule d'entre elles serait meilleure que les autres.

II.1.2 Résolution spatiale et capacité de détection

Plusieurs notions sont à différencier en télédétection : la taille du pixel, la résolution spatiale et la capacité de détection. La taille du pixel sur chacun de ces rasters (donc exceptés les CdN) est de un mètre. La résolution spatiale est le pouvoir séparateur, la capacité de compter des objets rapprochés, elle dépend de la taille du pixel. La capacité de détection dans ces images dépend du contraste entre l'objet et son environnement, de la différence de radiométrie (Polidori, 2007). Il est donc possible de détecter un objet plus petit que le pixel donc plus petit qu'un mètre dans notre cas si les conditions qui font varier la radiométrie sont suffisantes (différence de hauteur).

II.1.3 Analyse

II.1.3.a Etablissement d'un niveau de visibilité de site

Pour comparer ces cartes, il faut étudier la visibilité des sites sur chacune d'elles. Un niveau de visibilité sera défini sur 168 vestiges connus par les différents travaux d'exploration menés lors des années précédentes dans la réserve d'El Pilar : 125 unités de résidence, 14 terrasses, 8 dépressions et 15 carrières. Espérons que nous augmenterons ce nombre avec les travaux que nous mènerons sur le terrain et par la suite à partir des différentes informations qu'apportera cette étude. Il a été possible d'analyser et de comparer les différences de visualisation de chacune de ces images. Chaque vestige s'est vu attribué un niveau de visualisation (cf. illustration 17) sur chacune des 4 images selon trois échelons : visibles (Yes), ambigües (Maybe) et invisibles (No). Les comparaisons de ces nombres permettront par la suite de ne concentrer les recherches que sur certaines images.

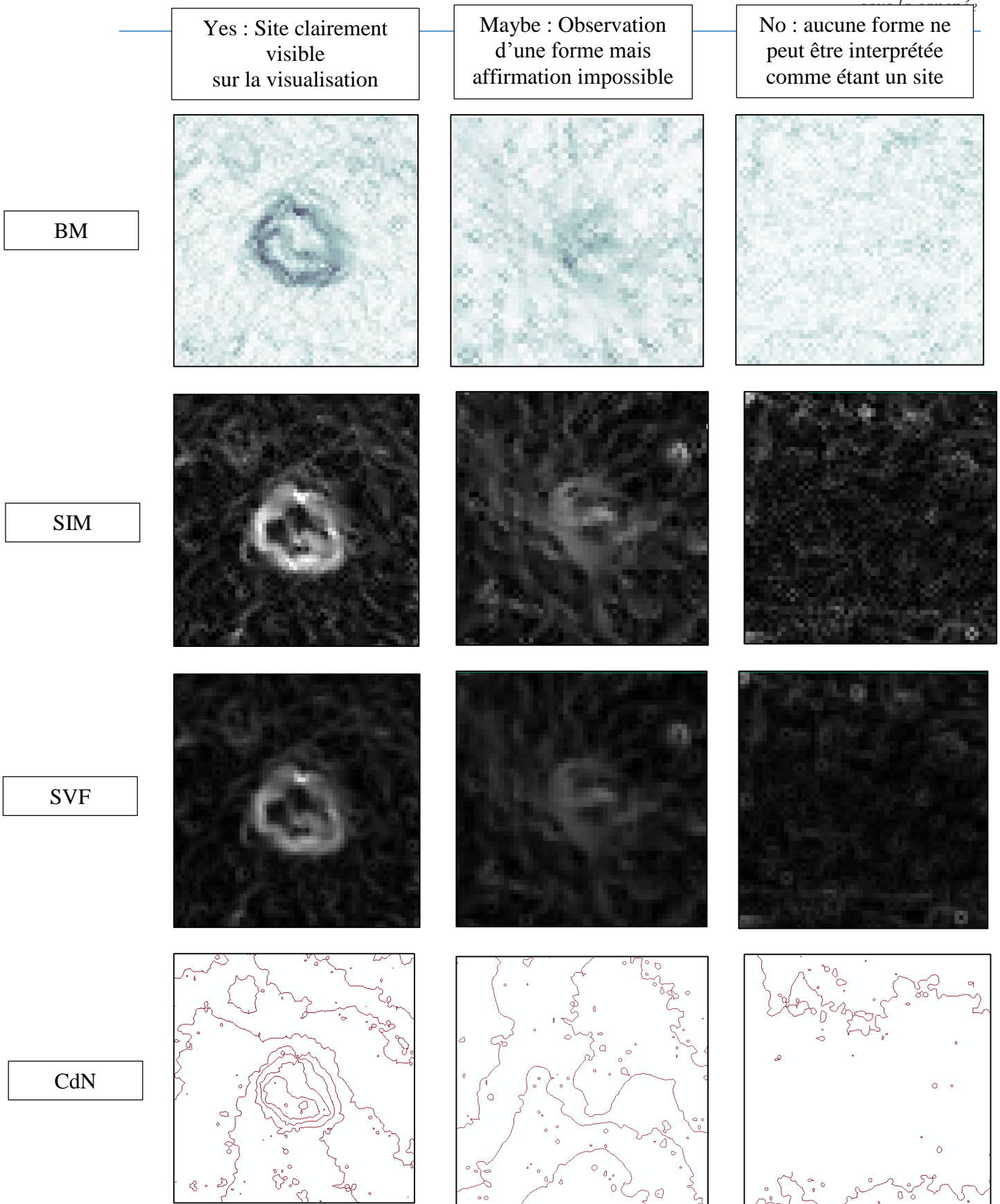


Illustration 17 - Capture d'écrans des différents niveaux de visibilité pour chacune des visualisations

La capacité de détection est différente dans chacune de ces images. Les contrastes offerts par le SVF et SIM sont mieux définis par la radiation en noir et blanc que par les couleurs choisies dans la BM qui reste tout de même clairement visible. Cette capacité est invariable dans les CdN qui ne sont pas pixélisés, elle est donc basée sur le nombre de lignes parallèles et fermées et donc sur la hauteur du site. La modélisation du sol est différente dans chacune d'entre elles par les algorithmes choisis, ainsi les sites sont plus ou moins visibles. Le nombre de sites visibles dans chacune de ces visualisations est donc différent.

II.1.3.b Comparaison des nombres de sites visibles

La visibilité de ces 168 sites connus a été classée dans ces trois catégories pour les quatre visualisations à disposition. L'attribution du niveau de visibilité s'est faite indépendamment pour chacune d'entre elle. Les nombres de sites visibles sur chaque carte sont présentés dans les diagrammes suivants (cf. illustration 18) :

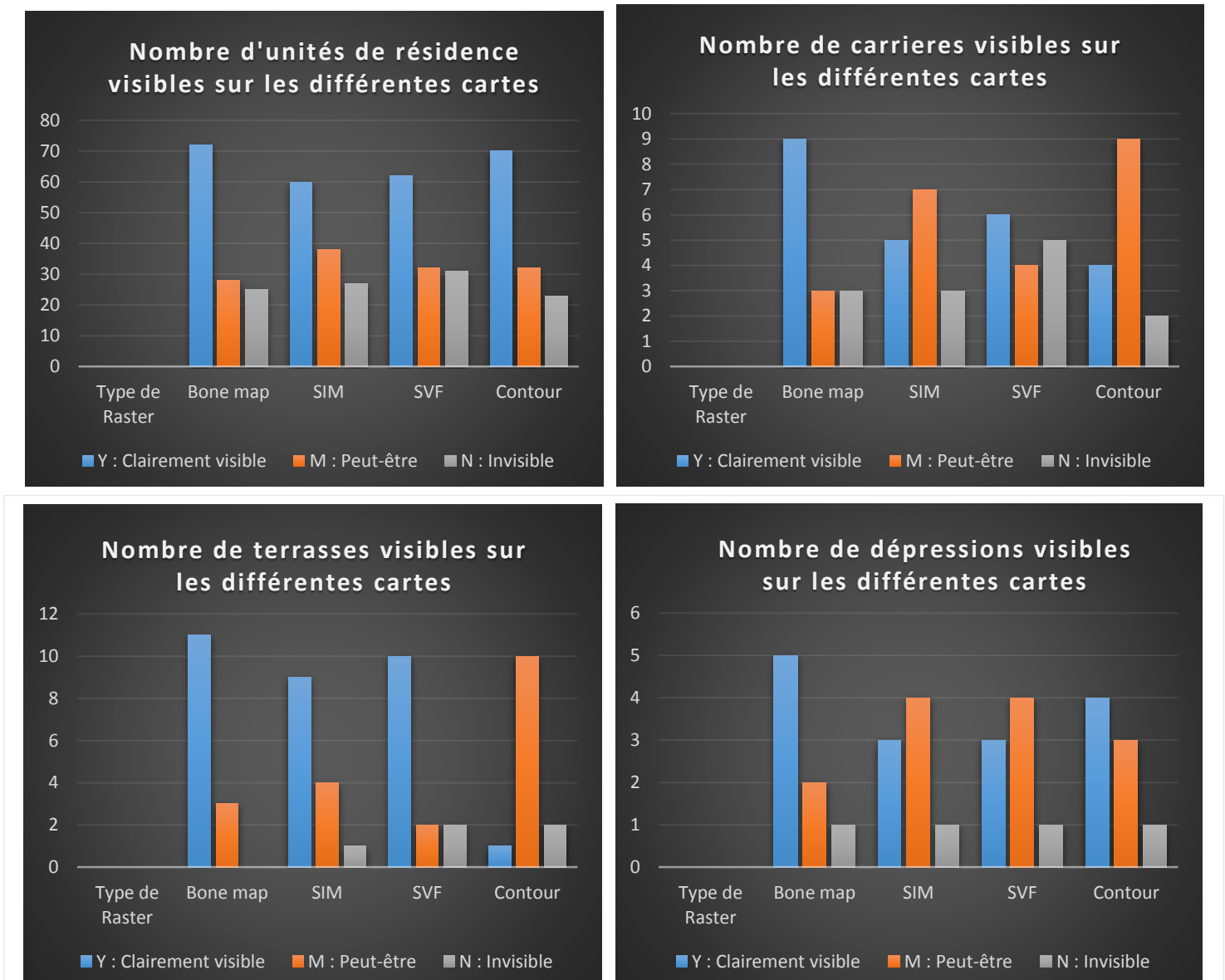


Illustration 18 - Diagramme du nombre de site visible dans les différentes visualisations

Ces résultats font clairement apparaître que la bone map a un meilleur taux de visibilité, pour n'importe quel type de structure. La visibilité des résidences est bonne pour chaque image, même si la bone map et les courbes de niveau (contour) se différencient légèrement avec plus de visibilité (respectivement 71 et 70) et moins d'ambiguïté et d'invisibilité que les images SVF et SIM. Le nombre de dépressions visibles montre également la supériorité de la bone map et des courbes de niveau et la légère infériorité des deux autres rasters. La visualisation des entités linéaires telles que carrières ou terrasses est par contre très faible dans le cas des courbes de niveau. Les terrasses sont très facilement visibles dans les trois rasters BM, SVF et SIM et les carrières légèrement moins.

L'illustration 18 ne le montre pas mais alors que les SIM et SVF ne parviennent pas à distinguer plus de sites que la BM, les CdN parviennent à distinguer six unités de résidence totalement invisibles sur toutes les autres cartes (la bone map parvient à en distinguer 7 indépendamment des courbes de niveau). Les courbes de niveau seraient donc également à prendre en compte dans la détection.

II.1.3.c Bone map et courbes de niveau comme images de base pour la détection

Les deux rasters qui ressortent donc de cette analyse sont la bone map et les courbes de niveau. A eux deux, ils parviennent à distinguer le maximum de sites connus possibles. La représentation plus détaillée et mieux définie ne laisse aucun doute sur la supériorité de la BM pour tous les types de sites, les étapes d'analyse et de détection seront donc plus poussées sur cette visualisation car elle présente des résultats moins aléatoires. Les courbes de niveau présentent également des intérêts dans la détection des éléments polygonaux et permettent ainsi d'accroître le nombre de détection d'unités de résidence.

Mais certaines questions peuvent se poser sur l'invisibilité de certains sites. Quelles sont les raisons ? Pourquoi ne voit-on pas tous les sites sur les rasters ? Ont-ils tous un dénominateur commun, peut-être est-ce la dimension, leur hauteur, la topographie du terrain ou l'épaisseur de la couverture végétale qui modifie le nombre de points du LiDAR qui atteignent le sol. Il faudra donc analyser ces facteurs et essayer de classer leur importance.

II.1.4 Densité de points dans la couverture végétale et au sol

II.1.4.a Calcul de la densité

Le nuage de points issu du levé LiDAR se distingue en trois types : sol, basse végétation et haute végétation (cf. illustration 19). Le calcul de la densité s'est réalisé sur des cellules de taille de 10x10 m² par rasterisation. Il a été préférable de choisir des cellules de cette dimension car la taille des sites peut atteindre une longueur d'une vingtaine voire une trentaine de mètres. A cause du parcours de l'hélicoptère, des angles de visées et d'autres facteurs, le nombre total de points varie sur ces différentes unités. En fonction de la visibilité des sites connus, la densité de points dans un rayon de 100 m² a été analysée.

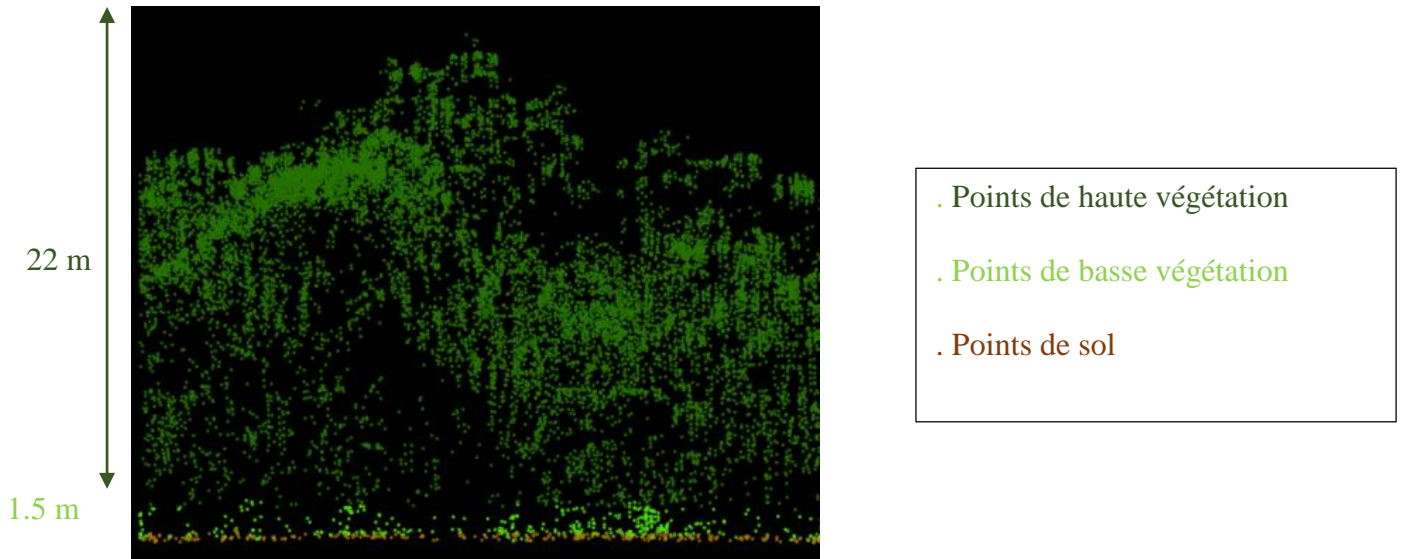


Illustration 19 – Coupe de 30 m de long sur 10 m de profondeur de la classification des points du LiDAR

Le calcul s’est effectué sur ArcGIS, un raster qui compte le nombre de points par cellule a été créé pour chaque couche. Les résultats sont donc 3 rasters, un de « sol », un de « basse végétation » et un de « haute végétation », composés de pixels de 100 m² qui comprennent une information sur le nombre de points. Ensuite à partir de la position des sites connus, il a été possible d’ajouter l’information sur le nombre de points à chacun de ces sites dont la visibilité varie. Une interpolation bilinéaire a été effectuée, entre les quatre cellules les plus proches du point. En d’autres termes, la valeur attribuée est une moyenne pondérée des valeurs des cellules aux alentours en fonction de leur position relative au point considéré.

II.1.4.b Répartition des points du laser dans chaque couche

Le tableau 3 ci-après représente le pourcentage de points émis par le LiDAR dans chaque couche. Sur les 165 points connus, où le niveau de visibilité a été précédemment défini, chaque information concernant le nombre de points réfléchis dans chaque couche sur une assiette de 100 m² (et qui a subi une interpolation bilinéaire) a été ajouté aux attributs du point. Ainsi par comparaison avec le nombre de points total réfléchis dans cette assiette, il est possible de calculer la répartition dans chaque couche.

Visualisation Bone map	Pourcentage de points au sol			Pourcentage de points dans la végétation basse			Pourcentage de points dans la végétation haute		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
N (invisible)	2.5	1	3.4	5	1.3	13.6	92.5	86.6	96.9
M (ambiguë)	2.9	0.9	6.8	6.2	1.7	23.8	90.9	69.4	97.1
Y (visible)	4	0.8	16.9	8.2	1.1	43.3	87.8	59.3	96.2

Tableau 3 - Pourcentage de points dans chaque couche

Les sites visibles ont une proportion de points de sol par rapport au nombre de points total dans une zone de 100 m² plus élevée : 4% contre 2.5% pour les invisibles et un pourcentage de points de végétation haute moins important 87.8% contre 92.5%. Les minimas de chaque visualisation dans chaque couche ne diffèrent pas significativement (environ 1% pour chaque visibilité dans les points de sol et de végétation basse) mis à part dans la végétation haute où le minimum de pourcentage de points est beaucoup plus fort dans le cas des sites invisibles que dans les visualisations claires ou ambiguës. Les maximas quant à eux sont beaucoup plus forts dans les points de sol ou dans les points dans la végétation basse pour le cas des sites visibles (17% de points au sol contre 3.4% pour les sites invisibles et 43% dans la végétation basse contre 14% pour les invisibles).

Ces valeurs sont cohérentes pour les couches de sol et de canopée. En effet, moins la canopée est dense, moins elle empêche les points d'atteindre le sol et permet ainsi d'améliorer la modélisation de ce terrain sur cette zone. Et à l'inverse, une épaisse canopée entraîne une perte d'informations sur les points au sol, conduisant à une mauvaise modélisation et une mauvaise détection. L'interprétation du sous étage végétal est plus délicate, il est nécessaire de regarder ce qui se passe dans les autres couches. Une canopée moins dense entraîne un plus grand nombre de points distribués dans les couches inférieures et plus significativement dans la consécutive : la sous végétation et, ainsi, au sol par la suite.

Le pourcentage est une donnée intéressante, il nous permet de nous rendre compte de l'abondance de la végétation ou de l'impact qu'elle a sur la détection mais elle ne nous dit pas combien de points exactement atteignent le sol.

II.1.4.c Densité de points de sol

La densité de points de sol est calculée de la même manière qu'auparavant c'est-à-dire à l'aide d'une interpolation bilinéaire d'une cellule de 100 m². Le tableau 4 ci-après présente les valeurs de ces densités pour chaque type de visualisation.

Visualisation BONEMAP	Moyenne	Minimum	Maximum
N (invisible)	43	19	70
M (ambiguë)	55	15	169
Y (visible)	77	12	362

Tableau 4 – Statistiques sur la densité de points de sol sur 100 m² pour chaque niveau de visibilité

Les nombres de points au sol des sites visibles sont en moyenne deux fois plus importants que ceux des sites invisibles. Un plus grand nombre de points de sol permet une meilleure modélisation du sol et ainsi une plus grande chance de détecter des sites. Mais un grand nombre de points n'est pas toujours source de visibilité, la détection n'est pas toujours évidente même si le nombre de points qui atteint le sol est significatif. Il est intéressant de voir qu'un point peut être invisible sur la bone map avec 70 points au sol sur 100 m². En effet, les points doivent être bien repartis sur le sol et le site cible doit être d'une taille suffisante. De plus, la hauteur du site semble être primordiale, un site pourrait avoir une grande taille, si sa hauteur est faible, il sera

sûrement difficile d'observer une forme. Nous verrons après la phase d'exploration, qui aura pour objectif de collecter les caractéristiques de ces sites, l'ordre de grandeur de ces dimensions.

Au contraire, un site peut être visible avec seulement douze points de densité. Sa dimension et sa hauteur doivent donc être suffisantes afin que cette faible quantité de points permette au LiDAR de détecter une entité.

Ces premières analyses nous apportent donc une première idée des critères de détection du LiDAR et de l'importance de la dimension des sites dans la détection. Lorsque le site semble être de grande dimension ou d'une hauteur importante, il n'est pas nécessaire d'avoir beaucoup de points au sol contrairement à lorsque le site est de petite dimension. Au contraire, lorsque le site semble être de faible dimension ou de faible hauteur, il est nécessaire d'avoir beaucoup de points pour le détecter. Il sera donc intéressant par la suite de s'intéresser aux dimensions des sites détectables et de ceux qui ne le sont pas et de remarquer leur correspondance avec la densité de points au sol.

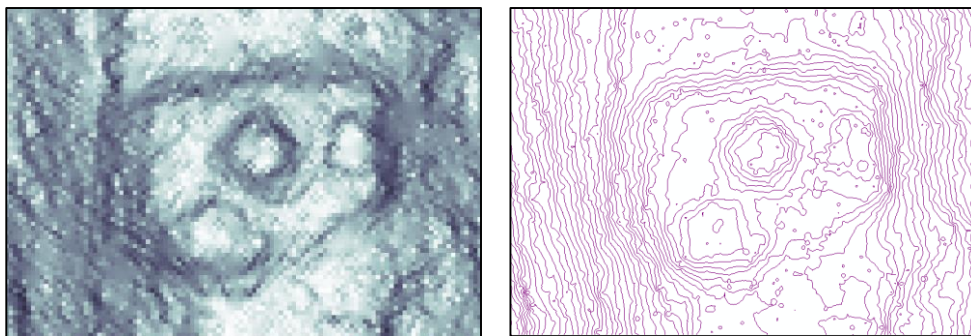
II.2 Détection des différentes entités de l'architecture Maya :

La détection des différentes entités de l'architecture Maya se fera visuellement. Une stratégie d'automatisation de détection avait été pensée mais la visualisation des sites est trop aléatoire, plus ou moins bien définie et les tailles et les formes différentes. Il aurait donc fallu créer un prototype pour chaque cas et cela s'est avéré beaucoup plus compliquée et sans gain d'information par rapport à la technique visuelle. C'est pourquoi la recherche et le marquage des points se sont effectués à l'œil, ce qui a également permis une certaine interprétation en fonction de la situation du terrain.

II.2.1 Visualisation des sites

La visualisation des 165 sites connus a été examinée en fonction de leurs types : monticules, dépressions, carrières et terrasses. Connaître les caractéristiques de visualisation de ces sites permettra de tenter ensuite de les identifier.

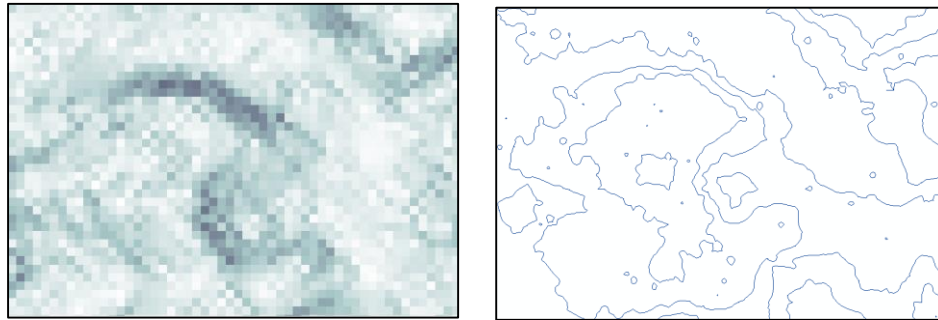
II.2.1.a Visualisation des unités de résidence



Illustrations 20 - Visualisation d'un site sur la bone map et les courbes de niveau

Les illustrations 20 montrent des exemples de visualisations d'une même PRU sur la BM et les CdN. On peut y observer trois monticules surélevés une place. Ces monticules apparaissent sous la forme d'ovale ou de cercle sur la bone map et comme une succession de lignes parallèles et fermées sur les courbes de niveau. Si le site est d'une hauteur plus faible, les courbes de niveau peuvent alors ne présenter qu'une seule ligne fermée d'une dimension d'une dizaine de mètres de long et la bone map présente alors une forme avec des contours moins définis.

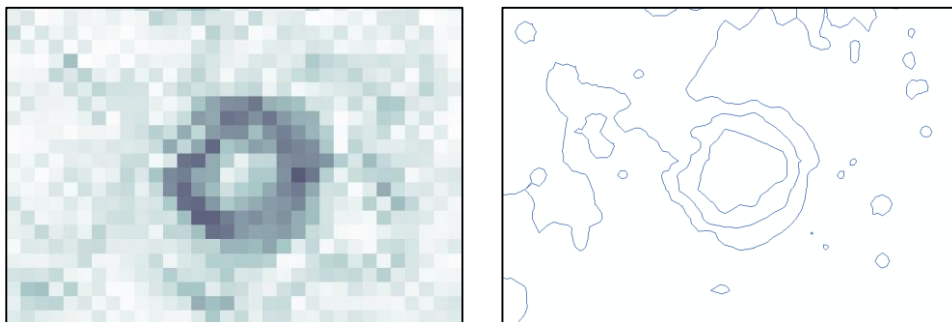
II.2.1.b Visualisation des carrières



Illustrations 21 - Visualisation d'une carrière sur la bone map et les courbes de niveau

Les illustrations 21 montrent des exemples de visualisations d'une même carrière sur la BM et les CdN. Les carrières apparaissent comme des entités linéaires, plus ou moins observables selon leur hauteur et leur type de forme qui peut être incurvée ou droite. Les carrières correspondent à des lignes très resserrées sur les courbes de niveau mais sont très difficilement identifiables dans les zones pentues. Leur détection sera donc concentrée sur la bone map qui est moins confuse.

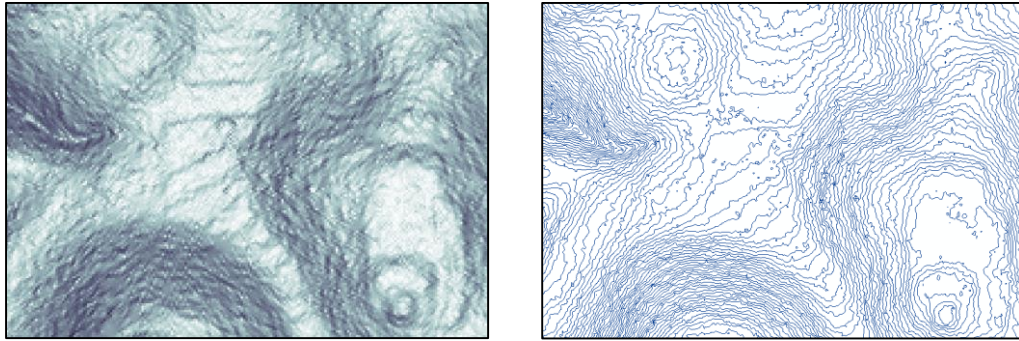
II.2.1.c Visualisation des dépressions



Illustrations 22 - Visualisation d'une dépression sur la bone map et les courbes de niveau

Les illustrations 22 montrent des exemples de visualisations d'une même dépression sur la BM et les CdN. La forme visible semble similaire à celle d'un monticule, toutefois légèrement plus rectangulaire. Nous observons sur ces deux images une forme polygonale qui indique un changement de relief mais nous n'avons aucune indication sur la bone map. Il est possible de regarder sur ArcGis l'élévation des courbes de niveau qui indique alors si nous sommes en présence d'une fosse ou d'une bosse.

II.2.1.d Visualisation des terrasses



Illustrations 23 - Visualisation de terrasses sur la bone map et les courbes de niveau

Les illustrations 22 montrent des exemples de visualisations de mêmes terrasses sur la BM et les CdN. Elles sont, comme les carrières, des entités linéaires et donc difficilement distinguables sur les courbes de niveau. Les terrasses sont généralement plusieurs, alignées, et apparaissent de manière plus ou moins parallèles en suivant la topographie du terrain, avec un espacement assez constant. Cette forme est caractéristique de ce site, utilisé pour l'agriculture. Dans ces images nous pouvons aussi observer 2 monticules situés respectivement au nord-ouest et sud-est. Une plateforme ou plaza est clairement distinguable pour la seconde et est probable pour la première.

II.2.1.e Réalité du terrain

Les ruines Mayas (bâtiments, plateformes, réservoirs) sont caractérisées sur le terrain par la présence de pierres à la différence contraire des banals monticules naturels de terre. A l'origine, ces bâtiments étaient relativement élevés (plusieurs mètres) mais l'érosion naturelle et les effets de la végétation ont eu raison de leur grandeur. Ils apparaissent aujourd'hui comme des monticules à peu près rectangulaires de taille variable (de quelques dizaines de centimètres à quelques dizaines de mètres). A l'inverse, les réservoirs eux sont sous la forme de dépressions. Comme a pu le montrer l'analyse de la densité, la végétation qui limite le nombre de points au sol est un premier obstacle à la détection. Ils empêchent de bien capter la topographie du sol et de détecter des formes intéressantes. Mais additionné à cela, les caractéristiques des sites sont des facteurs essentiels de la visibilité. La dimension, la hauteur, le nombre de structures, le type de forme modifient complètement la qualité de la détection. C'est pourquoi il suffit de seulement quelques points au LiDAR pour détecter des sites de grandes dimensions et de beaucoup de points pour ceux de petites. Quelles sont les caractéristiques des sites visibles, leur hauteur, dimension ? Et quelles sont celles des sites invisibles ?

II.2.2 Stratégie de la détection

La détection s'est concentrée sur une zone inconnue afin de n'avoir aucun a priori sur les points identifiés. Cette zone inexplorée d'approximativement 64 hectares se situe au Nord de la réserve (cf. illustration 24). Une détection de sites types y sera testée sur les diverses cartes à disposition ; bone map et courbes de niveau. Cette zone test s'étend de 200 m de chaque côté de la route traversant la réserve, elle n'a jamais été clairement explorée et sera donc parfaite pour tester une identification des sites.

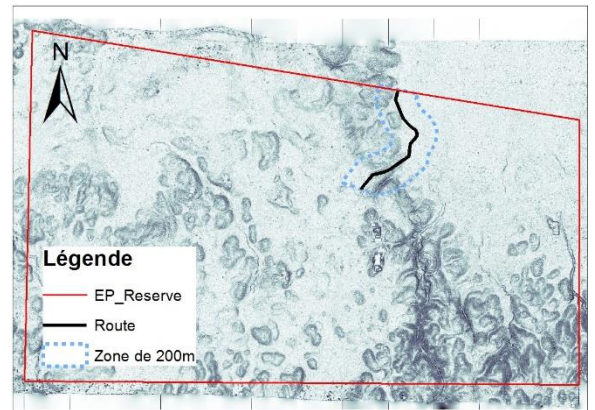


Illustration 24 - Situation de la zone à explorer

Des points identifiés⁶ sur les images bone map et courbes de niveau dans cette zone test seront ensuite explorés sur le terrain pour déterminer leurs caractéristiques et estimer leur pertinence, les obstacles rencontrés et les choix à faire pour la suite. Cette exploration ne se limitera pas à la reconnaissance sur le terrain de ces sites, il faudra aussi explorer toute la zone afin de déterminer les sites qui ne sont pas visibles. D'après ces résultats, il sera possible d'effectuer une analyse précise des sites visibles et invisibles, mais aussi de regarder les erreurs d'identification, les sites présumés qui ne sont que des artefacts de visualisation ou des artefacts naturels.

II.2.2.a Courbes de niveau

L'identification des points d'exploration « Exp » sur les courbes de niveau espacées de 50 cm s'est basée sur les caractéristiques de la visualisation des sites préalablement connus, c'est-à-dire sur leur topographie, sur les particularités du relief. Les sites se distinguent généralement par une surélévation et une surface plate en leur sommet. Les courbes de niveau pour les sites de grande hauteur se présentent alors comme plusieurs lignes parallèles avec une ligne de contour fermée en leur sommet ou plusieurs lignes de courbes de niveau fermées et parallèles. Pour les petits sites, une seule ligne est visible mais peut être difficilement interprétable en fonction de la topographie du terrain. Ainsi les reliefs, bosses, dépressions de plus de 50 cm devraient être identifiables sur les terrains plats, si la densité de points de sol le permet. 113 points Exp ont été identifiés sur les courbes de niveau, il sera par la suite nécessaire de savoir s'ils sont des sites archéologiques ou juste de simples formes du relief ou de simples plateaux.



Illustration 25 - Deux monticules dans une zone de pente sur les courbes de niveau

II.2.2.b Bone map

II.2.2.b.1 Identification

De la même manière que pour les CdN, la visualisation des sites préalablement connus a permis d'identifier 90 points Exp sur la BM dans la zone test. Sur ces 90 points, 36 sont en commun avec les 113 points identifiés sur les CdN. Ces points ont donc plus de chance d'être de

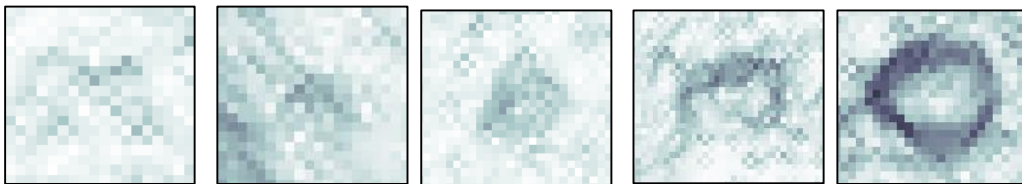
⁶ Annexe 6 : Carte des points identifiés sur les courbes de niveau et Bone map

réels sites sur le terrain. Si la visualisation de certains sites est évidente (présence de place, plusieurs sites surélevés) d'autres le sont beaucoup moins. Un pourcentage d'attente de chance de trouver un site a donc été déterminé sur ces points d'après le niveau de classification de visualisation estimé, le nombre de structure dans un rayon de 20 m et la présence d'une place.

II.2.2.b.2 Estimation d'un pourcentage d'attente sur les sites

Ces estimations donnent à titre indicatif une idée de la probabilité de trouver une unité de résidence sur la bone map. Les recherches se focalisent principalement sur la bone map car elle constitue la source la plus fiable et aussi par le souhait du laboratoire. Les facteurs ont été pondérés en fonction de leur importance :

- ❖ **Niveau de visualisation (Nv)** : le niveau de visualisation du monticule, forme très nette d'ellipse, un simple trait, ou une légère forme. Ce niveau de visualisation a été classé de 1 à 5, de très légèrement à clairement visible (cf. illustrations 26). Etant une donnée essentielle, le poids attribué à cette caractéristique est le plus fort de tous : $p=2.5/5$.



Illustrations 26 - Niveau de visualisation de 1 à 5 sur la bone map

- ❖ **Nombre de structures (N)** (cf. illustration 27) : Plus il y a de formes qui se distinguent et situées proches les unes des autres, plus il y a de chance que le point identifié soit culturel et fasse partie d'une zone d'habitation. De 1 à 3 structures au maximum et de poids $p=1/5$

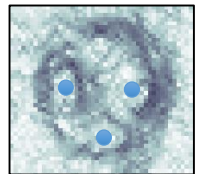


Illustration 27 - Trois monticules à proximité

- ❖ **Présence d'une place (P)** (cf. illustration 28) : La présence d'une place est caractéristique dans les structures Mayas. Elle augmente fortement la chance de trouver des vestiges. La valeur 0 signifie l'absence et 1 signifie la présence d'une place. Le poids associés : $p=1.5/5$

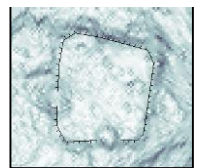


Illustration 28 - Présence d'une place

La formule 1 ci-après est celle qui a été appliquée afin de connaître le pourcentage d'attente :

$$\text{Attente (\%)} = ((2.5/5) * (Nv / 5) + (1/5) * (N / 3) + (1.5/5) * (P)) * 100 \quad (1)$$

Les facteurs en vert dans cette équation permettent d'avoir chaque valeur comprise entre 0 et 1. En effet le niveau de visualisation est compris entre 0 et 5, le nombre de structures entre 1 et 3 et la présence de place est définie par 0 ou 1. Ainsi, nous pouvons obtenir un pourcentage.

La table en annexe⁷ présente les résultats. Ce pourcentage d'attente a été déterminé à titre indicatif afin d'avoir une idée de la chance de trouver un site et l'expérience du terrain permettra d'estimer son intérêt.

II.2.3 Collecte de données

II.2.3.a Introduction

La phase terrain se distingue en deux types de travaux :

- L'exploration des points Exp sur la zone test : 90 de la BM et des 113 des CdN. Cette phase comprend également la mesure de sites invisibles (In) qui n'avaient pas été détectés sur les LiDAR mais qui ont été découverts sur le terrain
- Indépendamment de la détection, une vérification de sites incertains, définis lors des explorations des années précédentes, est également à effectuer à l'échelle de la réserve d'El Pilar. Cette inspection permettra de confirmer leur présence et prendre leurs mesures. Les caractéristiques de ces sites servent au calcul du nouveau LI.

Chacune de ces phases comprend la recherche du point en question, son observation, son pointage des coordonnées et la mesure de ses dimensions (hauteur, longueur, largeur). Cette dernière information est capitale car elle sera la base de nos analyses postérieures.

II.2.3.b Situation du terrain et protocole

Le site d'El Pilar est situé à une distance significative de la base Brass (cf. illustration 29), tous les jours 2h de trajet aller-retour sont nécessaires car la route est en très mauvais état. Il est donc important d'être le mieux préparé afin de rentabiliser au maximum le temps sur le terrain.

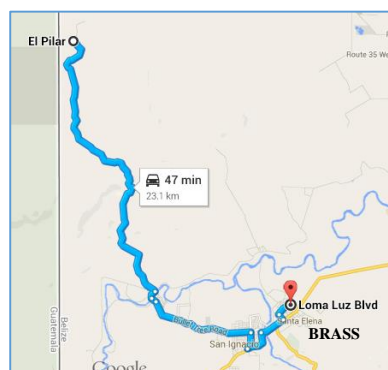


Illustration 29 – Trajet quotidien entre BRASS et El Pilar
Source : Google Maps

⁷ Annexe 7 : Table des attentes en pourcentage des points identifiés sur la bone map

II.2.3.b.1 Transfert SIG - GPS

Les points identifiés lors des visualisations ont été pointés sur Arcgis et donc connus en coordonnées sous le système WGS 1984 UTM zone 16 N. Ils sont transférés vers les GPS à disposition à l'aide de l'interface DNR Garmin. Sur le terrain les indications fournies par le GPS et la boussole nous permettent de nous diriger sur le point avec plus ou moins de difficulté pour traverser la végétation. Le GPS a une précision de l'ordre de 7 m, il est donc souvent nécessaire d'explorer les alentours afin de trouver le site recherché.

II.2.3.b.2 Exploration totale de la zone

Il est important de savoir ce qui est visible d'après le LiDAR et ce qui ne l'est pas. Il est donc primordial d'explorer la totalité des 2 hectares de la zone test afin de relever aussi les sites qui n'étaient pas identifiés sur les images. La portée de vue peut varier dans la forêt en fonction de la densité de la sous végétation, elle peut être de 5-10 m lorsque la zone est très dense à une vingtaine de mètres lorsqu'elle est plus abordable. Un quadrillage du terrain par des lignes parallèles de 20 m a donc été établi pour explorer la totalité du terrain.

II.2.3.b.3 Fiches de terrain

La phase d'exploration est accompagnée de différentes fiches afin de relever les données nécessaires :

- ✓ une fiche de commentaires⁸ qui concentre toutes les observations et notes de la journée (l'heure d'arrivée, la météo, animaux rencontrés).
- ✓ Une fiche de situation⁹ par grille de 200 m x 250 m, qui correspond à une partie de la bone map avec les points à explorer et qui permet d'ajouter différentes notes et les positions approximatives des sites trouvés.
- ✓ une fiche de dessin¹⁰ qui permettra de dessiner ensuite les sites sur ArcGis. Cette fiche comporte différentes données telles que le croquis détaillé du site (position, dimensions, hauteur de chaque monticule), les numéros des points de dessin pris au GPS, et le nom des arbres aux alentours.
- ✓ Un tableau d'exploration¹¹ comportant le nom des sites à explorer, leurs dimensions, hauteurs, le nombre de sites, la pente du site (de 1 à 3, faible à forte), les caractéristiques du terrain (pente, plat...) et des notes qui servent essentiellement à décrire lorsque le point identifié ne correspond pas à un site.

⁸ Annexe 8: Fiche de commentaires

⁹ Annexe 9 : Fiche de situation

¹⁰ Annexe 10 : Fiche de dessin

¹¹ Annexe 11 : Tableau d'exploration

Chaque fiche réalisée sur le terrain a une importance capitale pour le laboratoire, elle est la trace officielle des mesures effectuées. En effet, étant donnée la quantité de gens de tous secteurs qui est amenée à travailler au laboratoire sur ces données, il est essentiel de garder une preuve de l'état du terrain. Nous avons été confrontés à ce problème dès le début de notre travail, certaines données étaient suspectes et sans ce genre de fiche, une nouvelle exploration sur le terrain est nécessaire et engendre une perte de temps. La conservation des données et l'écriture des métadonnées est donc nécessaire pour l'avenir des recherches de Brass et éviter la perte de temps à refaire des explorations déjà effectuées.

II.2.3.c Expérience du terrain

Ce travail est réalisé par équipe de 2. Un garde forestier accompagne (cf. illustration 30) afin de dégager le terrain à l'aide d'une machette et permettre l'exploration sous nos indications d'itinéraires. Ce garde forestier est indispensable, il connaît parfaitement la faune et la flore aux alentours et donc les dangers, et surtout, grâce à son expérience, il arrive facilement à distinguer l'organisation et la position des sites qui n'est pas toujours évidente. En effet un site est enfoui sous un tas de terre, il est la plupart du temps écroulé et a subi les déformations du temps. Il peut donc devenir très difficile à mesurer précisément et nécessite un œil expérimenté.



Illustration 30 – Photographie de Narcisso, un garde forestier, un jour d'exploration

Les caractéristiques qui nous intéressent et qui ont été relevées sur le terrain sont donc tout d'abord la description du site (M : monticule, Q : carrière, N : naturel, D : dépression), puis si le site est une entité culturelle, archéologique :

- ✓ la hauteur : hauteur du plus haut point du mont
- ✓ la dimension des structures : pour les sites polygonaux, la dimension correspond à la diagonale, calculée à partir de la longueur et la largeur ; pour les sites longitudinaux tels que les carrières ou terrasses, la dimension est la longueur curviligne
- ✓ le nombre de structures dans la même zone
- ✓ la présence d'une place
- ✓ le type de terrain : plat, pentu, très pentu.

Lorsqu'un site est découvert, toutes les fiches présentées précédemment sont complétées. Les mesures sont prises et ajoutées au tableau, et le périmètre ou la forme des structures est également relevé à l'aide du GPS. Les journées sont organisées par la phase terrain de 7h du matin

à 4h de l'après-midi puis par le traitement et le dessin des données au retour au Bureau. Vingt-deux journées sur le terrain ont été nécessaires à l'accomplissement de ces deux phases. L'exploration a permis de découvrir 77 nouveaux vestiges et la vérification de confirmer 134 anciens sites.

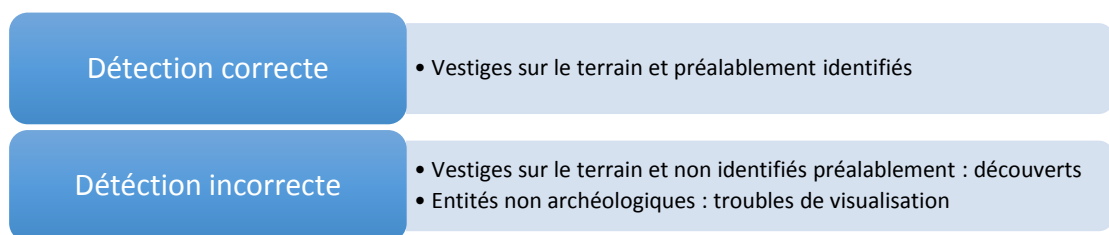
II.2.3.d Traitement des données

Au retour du terrain, les données de chaque GPS sont déchargées et les points insérés dans ArcGIS avec l'interface DNR Garmin. Ensuite grâce au croquis de terrain et aux points mesurés par le GPS, les différentes structures sont dessinées dans différents calques en fonction de leur type. Le dessin des sites se fait également d'après les visualisations sur le LiDAR dont les positions sont parfois plus précises que celles relevées au GPS.

Les tables comportant les données sur les sites découverts, les faux sites (préalablement identifiés mais qui se révèlent comme ne pas être archéologiques) et les nouveaux points découverts sans avoir été préalablement identifiés sur la bone map¹² et les courbes de niveau¹³ sont numérisés. Cette numérisation permettra l'analyse postérieure.

La partie terrain a pris beaucoup de temps, par la quantité de points qui étaient à mesurer ou à contrôler et par les contraintes liées à la végétation. Avancer dans cette épaisse jungle devient vite une histoire compliquée et la pluie a souvent interrompu nos journées, nous empêchant de réaliser les différents croquis et fiches de terrain. De plus, vue la quantité de points à contrôler, nouveaux comme anciens (plus de 200 dans la totalité), la phase terrain a pris le dessus sur la phase laboratoire.

La phase d'exploration et de détection a permis de collecter beaucoup de données sur plusieurs types de points :



La phase d'analyse va maintenant essayer de comprendre le rapport entre la visualisation des sites sur les images et leurs caractéristiques sur le terrain.

¹² Annexe 12 : Mesures des points Exp de la bone Map

¹³ Annexe 13 : Mesures des points Exp des CdN

III Analyses

III.1 Introduction

Ces analyses vont apporter pour la première fois pour le monde archéologique une idée de ce que le Lidar est capable de détecter, des dimensions et des types de sites. Les facteurs essentiels à la détection des ruines archéologiques sont bien sûr la dimension des structures, leur hauteur, leurs pentes, le nombre de structures, la présence ou non de plateforme. Additionnées à cela, les caractéristiques environnantes comme la densité et le type de végétation, la pente du terrain jouent également un rôle fondamental.

III.2 Analyses

III.2.1 Analyse des résultats de l'exploration

III.2.1.a Présentation des résultats

Les 203 points Exp ont révélé différents types de sites¹⁴:

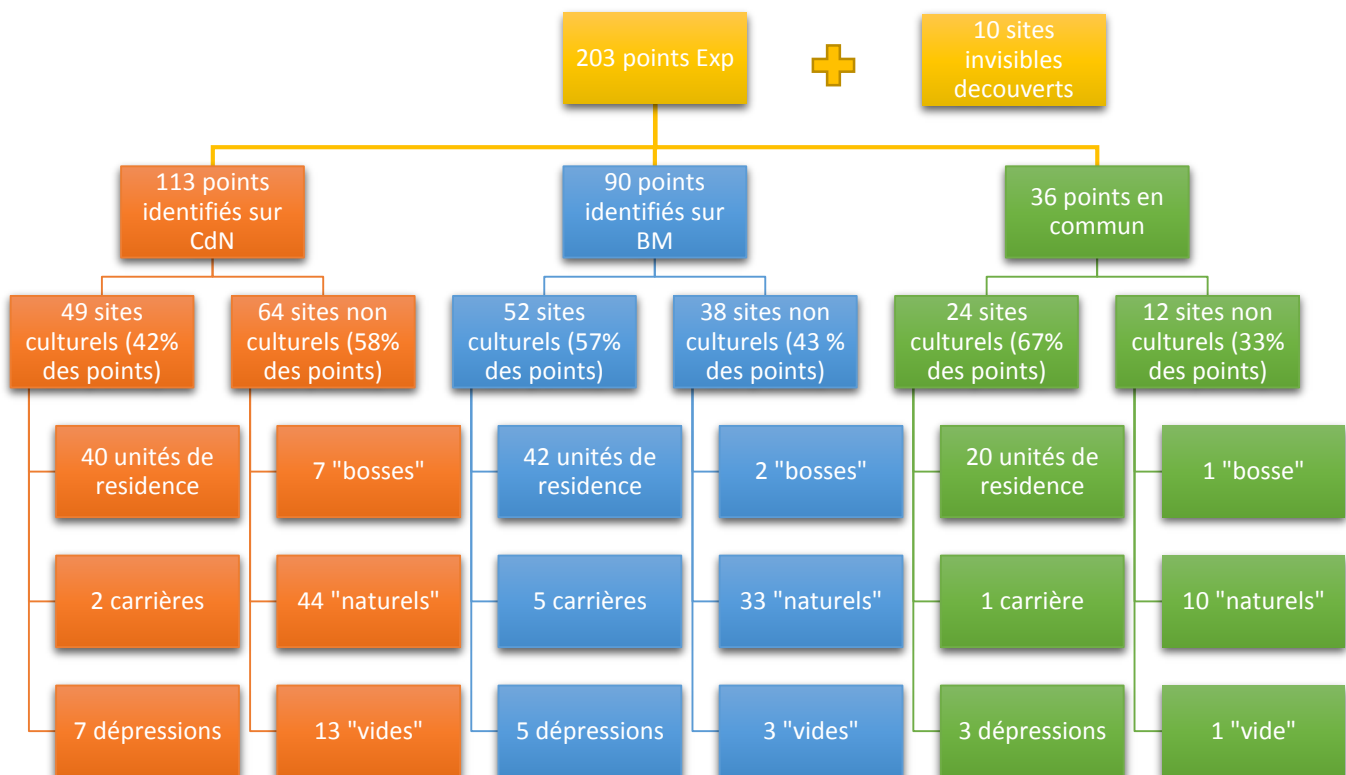


Illustration 31 - Résultats de la phase d'exploration

¹⁴ Annexe 14 : Carte de répartition des sites identifiés explorés

L'illustration 31 présente les différents résultats de la phase d'exploration. 77 sites culturels contre 90 non culturels ont été reconnus. 10 sites qui n'avaient pas été identifiés sur les rasters ont également été découverts.

La bone map a un meilleur taux de détection de site archéologiques que les courbes de niveau, 57% des points identifiés se sont avérés être des ruines Mayas contre 42%. Elle détecte donc moins d'artefacts, de sites non culturels. Les points vides ne correspondent à rien sur le terrain, les courbes de niveau en comptent plus que la bone map, 13 contre 3 vides. La bone map apparaît définitivement comme la meilleure source de détection.

Les points en commun identifiés sur les deux images (et qui indiquent donc une même position) s'avèrent être très puissants. 67% de leur totalité sont des vestiges (10% de plus que la bone map) et seulement un « vide ».

28 sites découverts ont été uniquement identifiés sur la bone map et 25, uniquement sur les courbes de niveau. Ainsi, même si la bone map a un meilleur rendement, les courbes de niveau s'avèrent productives et indispensables afin de maximiser le rendement. Il sera donc nécessaire de continuer à les prendre en compte dans le futur de l'exploration des sites archéologiques du laboratoire Brass.

III.2.1.b Limite à la détection

On décompte également un certain nombre de sites non culturels. La phase d'exploration s'avère donc indispensable. Sans elle il est difficile d'affirmer la présence de sites archéologiques même si les visualisations présentent des caractéristiques évidentes de l'architecture Maya telle qu'une place et plusieurs monticules proches. Par exemple, certains points identifiés sur des places sont en réalité des arbres écroulés ou de simples bosses naturelles. En effet, la nature rend le travail d'exploration un peu plus long à cause des artefacts de visualisation qu'elle produit avec le LiDAR. Regardons-les de plus près :

- 8 bosses naturelles qui sont logiquement visibles sur les courbes de niveau et qui pourraient être assimilées à des ruines Mayas à cause de leur dimension mais qui sont en réalité des tas de terres dus à la topographie naturelle.
- 67 éléments naturels qui correspondent à des éléments de la nature : débris, arbres... et qui par leur taille et leur hauteur peuvent être assimilés à un monticule lors de leur détection. On décompte :
 - 46 souches d'un arbre de type palmier « corozal » (cf. illustration 32), couche de débris au pied de l'arbre qui se forme lors de sa croissance et qui peut mesurer jusqu'à 1.50 m de haut sur 7 ou 8 m de long.
 - 17 arbres écroulés (cf. illustration 33) qui lors de leur basculement entraînent une grosse forme de terre emprise par leurs racines.

- 4 zones de fougères pteridium (cf. illustration 34) très denses qui semblent être interprétées comme des points de sols par le LiDAR, une reclassification pourrait donc être intéressante.



Illustration 34 - Débris de corozal



Illustration 33 - Racines déterrées (arbre écroulé)



Illustration 32 - Fougères Pteridium

- 16 zones vides : Ces zones sont des surfaces sans intérêt topographique.

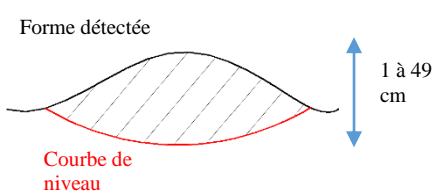


Illustration 35 - Zone vide sur les courbes de niveau

- Les courbes de niveau sont fermées et correspondent à une même altitude. Ces zones permettent de se rendre compte que les courbes de niveau sont parfois difficilement interprétables. Une zone comprise dans la courbe de niveau fermée est inférieure à 50 cm, elle peut donc mesurer de 1 cm ou de 49. Ces zones de vides sont donc des zones de très faible altitude et qui ne correspondent à rien.

- La bone map quant à elle a dû subir une mauvaise classification des points, des mauvais points ont peut-être été interprétés comme des points de sol et font donc des artefacts de visualisations

Le facteur le plus contraignant par son nombre est le débris de corozal. Le site d'El pilar décompte de nombreuses zones couvertes par ces arbres qui aiment l'eau et donc les zones en aval. Il serait intéressant pour la suite de l'avenir de l'exploration de Brass base de cartographier l'ensemble de ces zones pour prévoir la possibilité d'une détection corrompue. Quant aux arbres écroulés et aux fougères, il est impossible de les prévoir à cause de leur disparité. Nous avons observé un grand nombre d'arbres écroulés dû à un ouragan qui a ébranlé la zone en 2010 : « Hurricane Richard ». Survenu juste avant le passage de l'hélicoptère et des mesures LiDAR sur la zone, il nous cause un certain nombre d'artefacts de visualisation.

III.2.2 Caractéristiques des différentes entités

Cette partie va étudier les caractéristiques des différents types de points rencontrés. Tout d'abord, nous verrons celles des points d'exploration avec les unités de résidence et des autres types de vestiges, puis nous regarderons celles des points invisibles, c'est-à-dire découverts sans avoir été identifiés préalablement sur les visualisations.

III.2.2.a Caractéristiques des unités de résidence

Les caractéristiques des 62 unités de résidence détectées avec la BM et les CdN sont présentées dans le tableau 5 suivant :

Hauteur moyenne	2.0 m	<i>Hauteur min</i>	0.5 m
		<i>Hauteur max</i>	6 m
Dimension moyenne	12 m	<i>Dimension min</i>	6 m
		<i>Dimension max</i>	32 m
Moyenne du nombre de structures	2	<i>Minimum du nombre de structures</i>	1
		<i>Maximum du nombre de structures</i>	6
Longueur zone moyenne	23 m	<i>Longueur zone min</i>	6 m
		<i>Longueur zone max</i>	45 m
Densité de points de sol moyenne (100m²)	40	<i>Densité de points de sol min (100m²)</i>	10
		<i>Densité de points de sol max (100m²)</i>	215

Tableau 5 - Caractéristiques des sites détectables

Ces analyses nous donnent un premier ordre de grandeur de la visibilité du LiDAR dans les deux rasters. Le site type visible serait donc d'une hauteur d'environ 2 m, d'une dimension de 12 m en diagonale et d'une forte pente. Ces sites sont en général constitués de deux structures et d'une longueur de zone de 23 m en moyenne. 40 points qui atteignent le sol sur 100 m² seraient nécessaires pour détecter un site type. La densité de points de sol moyenne est relativement faible dans cette zone comparée à la densité présentée dans le paragraphe III.4. En effet la densité de végétation de la zone est très dense, ce qui n'arrange pas la qualité de la détection. Il n'y a pas une grande différence dans les caractéristiques de ces points avec les monticules observés avec les courbes de niveau et la bone map.

Il est également intéressant d'étudier les minima et maxima, un site peut être visible alors qu'il ne mesure que 50 cm de haut ou une dimension de 6 m ou encore avec seulement 10 points au sol sur 100 m².

III.2.2.a.1 Raison de la visibilité de monticules de faible dimension

Le tableau 6 suivant présente les caractéristiques de trois points visibles sur les images alors qu'ils sont de faibles dimensions :

ID	Type	Hauteur Max (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Diagonale Monticule (m)	Pente	Nombre de structures	Long ZONE (m)	Terrain	Densité (100m ²)
509	M	0.5	12	3	12.4	1	1	14	F	35
578	M	0.5	6	3	6.7	1	1	7	F	57
618	M	0.5	6	3	6.7	1	2	28	F	29

Tableau 6 - Caractéristiques de trois sites de faible dimension

Ces 3 points de hauteur très faible (50 cm) et pour certains de faible longueur sont visibles sur les courbes de niveau. Les raisons de leur visibilité sont différentes :

- ✓ Le point 509 a une densité de points faible mais sa dimension de 12.4 m de diagonale lui permet sa détection.
- ✓ Le monticule 578 mesure 6.7 m de diagonale, donc relativement faible, malgré sa faible dimension et sa faible hauteur ce point est visible grâce à la bonne densité de points de sol de cette zone (57 points pour 100 m²).
- ✓ Le monticule 618 est de faible dimension, de faible hauteur et de faible densité de points de sol. Sa visibilité quant à lui est due à la présence d'une autre structure dans sa zone, qui a rendu sa faible visualisation suspecte et donc identifiable.

Ils sont également tous les trois situés dans un terrain « F » (flat) qui signifie plat. En effet il y est plus facile de remarquer les faibles variations d'altitude que dans les zones pentues, plus souvent bosselées.

III.2.2.a.2 Raison de la visibilité de monticules de faible densité de point de sol

Le tableau 7 présente les caractéristiques de trois points visibles sur les images alors qu'ils sont de faibles densités :

ID	Type	Hauteur Max (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Diagonale Monticule	Pente	Nombre de structures	Long ZONE	TERRAIN	densité (100m ²)
588	M	4.5	12	20	23.3	3	6	45	F	10
585	M	3	30	10	31.6	3	6	45	F	13
537	M	2.5	5	4	6.4	2	2	24	F	15

Tableau 7 - Caractéristiques de 3 sites de faible densité de points de sol

Ces 3 points de densité très faible (10 à 15 points de sol pour 100 m²) sont visibles sur les courbes de niveau. Les raisons de leur visibilité sont différentes :

- ✓ Le point 588 est d'une très grande dimension 23.3 m de long et 4.5 m de haut. Les seuls points qui atteignent le monticule suffisent pour le rendre détectable tant la différence de hauteur est importante.
- ✓ Le monticule 585 est situé dans la même zone que le point 588, sa densité de points est donc également faible et les raisons de sa visibilité sont les mêmes que précédemment, sa grande dimension.
- ✓ Le point 587 est beaucoup plus petit que les précédents mais sa hauteur maximale reste haute, quelques points du LiDAR ont capté son sommet et ont suffi à le rendre décelable.

La dimension des monticules et la densité de points de sol sont très importantes dans la détection des sites. En effet, la visualisation avec le LiDAR est basée sur la différence de hauteur. Plus un site est haut et plus il est visible. La taille joue aussi un rôle prépondérant. En effet, plus le site est de grande dimension, plus les points émis par le LiDAR ont de chance d'atteindre l'amont de la plateforme et détecter ainsi une différence de hauteur avec les points situés en aval. On se rend donc compte que ces données sont liées, un point a beau être d'une grande dimension, si aucun point du LiDAR ne le rencontre, il ne sera pas détectable et inversement un site minuscule aura beau avoir énormément de points atteints, il n'y aura rien à détecter.

III.2.2.b Caractéristiques des autres sites culturels

Le tableau 8 présente les caractéristiques des autres vestiges archéologiques trouvés (dépressions, carrières, bosses) :

Type de site	Dépressions	Carrières	Bosses
Nombre	12	7	9
ΔZ moyen (m)	1.9	1.2	1.0
ΔZ min (m)	0.5	0	0.4
ΔZ max (m)	4	2	1.7
Dimension moyenne (m)	13	16	10
Dimension min (m)	5	12	4
Dimension max (m)	19	20	16
Moyenne de la densité (100 m²)	88	43	82
Min de la densité (100 m²)	41	13	19
Max de la densité (100 m²)	195	88	239

Tableau 8 - Caractéristiques des autres sites culturels

Ces sites ont des formes différentes. Quel que soit le type de forme (linéaires, polygonales..), les sources de détection restent la hauteur et la dimension du site. Les caractéristiques moyennes des sites sont toujours de l'ordre du mètre en hauteur et d'une dizaine de mètres en longueur. On remarque que les dépressions ont une densité de points plus importante. En effet, ces petits réservoirs d'eau empêchent les arbres de pousser ce qui permet d'avoir moins d'obstruction de végétation et plus de points de sol.

III.2.2.c Caractéristiques des sites invisibles

Le tableau 9 ci-après présente les moyennes des caractéristiques des 10 sites découverts lors de la phase exploration et qui n'avaient pas été identifiés préalablement¹⁵.

¹⁵ Annexe 15 : Table complète des sites invisibles découverts

Hauteur moyenne	0.4 m	<i>Hauteur min</i>	0.2 m
		<i>Hauteur max</i>	1 m
Dimension moyenne	5 m	<i>Dimension min</i>	3 m
		<i>Dimension max</i>	10 m
Densité de points de sol moyenne (100m²)	49	<i>Densité de points de sol min (100m²)</i>	27
		<i>Densité de points de sol max (100m²)</i>	77

Tableau 9 - Caractéristiques des sites invisibles

Il est donc clair que les sites découverts lors de l'exploration sont de plus faible hauteur et dimension que les sites détectables : 40 cm d'hauteur moyenne et taille de 5 m. Les points invisibles sont tous des structures uniques et leur pente est très faible. Le site 9 de hauteur de 1 m et de densité de points de 77 devrait être identifiable mais est situé dans une zone de pente¹⁶ lors de l'exploration, rendant sa visualisation confuse. Le point 8 a également une bonne densité de points mais sa dimension est trop faible pour qu'il soit visible (cf. annexe 15 et 16).

III.2.2.d Récapitulatif des résultats de l'exploration

Le tableau 10 récapitule les caractéristiques des sites visibles et invisibles :

Caractéristiques	Site visible	Site invisible
Hauteur moyenne	2.0 m	0.4 m
Dimension moyenne	12 m	5 m
Pente moyenne	2.4	1
Moyenne du nombre de structures	2	1
Longueur zone moyenne	23 m	5 m
Densité de points de sol moyenne (100 m²)	40	49

Tableau 10 - Récapitulatif des résultats

La hauteur moyenne des sites visibles est cinq fois plus haute que celles des sites invisibles. La dimension moyenne du monticule, plus de deux fois plus grande. La densité de points des sites invisibles, qui est raisonnable, ne suffit pas à la détection de ces sites de faible dimension. Nous pouvons donc considérer que la dimension des sites joue un rôle plus important que la densité de points. Cette dernière doit toutefois être suffisamment grande pour rendre des

¹⁶ Carte de répartition des sites "invisibles" découverts

sites détectables. Ces résultats correspondent à la zone étudiée mais peuvent varier sur l'échelle de la réserve d'El Pilar où le type de végétation qui joue son rôle varie considérablement en fonction de l'élévation et de l'hydrographie. Le facteur qui semble avoir le plus d'impact reste tout de même la dimension du site. Lorsqu'un site est de dimension faible mais de hauteur correcte, il peut être visible avec peu de points de densité. La répartition des points est donc également un facteur évident de la détection.

La détection sur la zone d'exploration a permis d'identifier 77 sites et en a omis 10. La détection a donc permis d'identifier presque 90% des sites sur cette zone test. Ce chiffre est très rassurant concernant les avantages du LiDAR, sachant que les sites invisibles sont tous de très petite taille et difficilement visibles également dans la réalité.

III.2.3 Pourcentage d'attente

Le pourcentage d'attente déterminée avant la phase d'exploration (cf II.2.2.b.2) estimant la chance de trouver un vestige sur le terrain s'est avéré être une donnée très intéressante. Le tableau 11 suivant montre les résultats des pourcentages d'attente pour chaque type de site :

Type de site	Bosses	Dépressions	Monticules	Naturels	Carrières	Vides
Moyenne des attentes (%)	22	67	55	24	40	21

Tableau 11 - Pourcentage d'attente en fonction du site découvert

Le pourcentage d'attente est une donnée intéressante¹⁷, un pourcentage supérieur à 50% montre la présence d'un monticule. Le haut pourcentage des dépressions est un cas particulier. En effet sur les 5 dépressions identifiées, 3 sont situées très proches et ont donc un pourcentage d'attente très fort ce qui fait considérablement augmenter leur moyenne. On remarque aussi que les taux sont relativement faibles pour les sites non archéologiques (de 21 à 24%). La formule utilisée est donc adaptée. Les faibles pourcentages nécessitent quand même une vérification sur le terrain, un monticule a été découvert avec une attente de 17%.

Une amélioration de la formule est toutefois possible, le niveau de visualisation, le nombre de points à proximité et les poids associés sont corrects, mais la caractéristique concernant la présence d'une place devrait être changée en tant que « configuration du terrain ». En effet, une nouvelle exploration test sur une zone au sud-est d'El Pilar a permis de se rendre compte que les sommets de collines comportaient très souvent des vestiges de résidence Mayas (6 collines explorées et 6 PRU trouvés en leur sommet). La nouvelle caractéristique à considérer serait donc la configuration du terrain, et les valeurs associées dans l'application de la formule seraient 1 pour un terrain propice (sommet de colline ou présence de place) et 0 dans le cas contraire.

¹⁷ Voir annexe 17 : Table des résultats de points des pourcentages d'attente

La nouvelle formule à appliquer serait donc la suivante (2) :

$$\text{Attente (\%)} = ((2.5/5) * (N_v / 5) + (1/5) * (N / 3) + (1.5/5) * (C)) * 100 \quad (2)$$

Avec : N_v : niveau de visualisation de 1 à 5

N : nombre de points à proximité de 1 à 3 sauf cas exceptionnel

C : configuration du terrain, 0 ou 1 pour une situation conforme

III.2.4 L'avenir de la détection pour Marc

La méthodologie appliquée lors de ce travail de recherche serait intéressante à appliquer sur toute la réserve d'El Pilar. C'est-à-dire continuer dans cette optique de détection des entités présumées et les explorer ensuite sur le terrain afin de les confirmer. La détection sur les courbes de niveau est aussi importante que celle sur la bone map, elle parvient à détecter un grand nombre de sites indépendamment et sera donc à continuer également. La méthode du pourcentage d'attente pourra surement être améliorée en fonction de certains facteurs que l'expérience du terrain amène à découvrir mais elle fournit déjà une bonne idée sur la chance de trouver un vestige.

La détection peut toujours être améliorée, sachant qu'elle se concentre sur 3 niveaux : la visualisation, la détection elle-même et l'exploration. Il est intéressant de les regarder un à un et de voir les améliorations possibles, développant ainsi les chances de détecter des sites.

- ✓ Les visualisations de base : La visualisation de la bone map pourrait toujours être améliorée par des algorithmes permettant un filtre de sol mieux appliqué, évitant ainsi d'avoir des artefacts de visualisation correspondant à des vides sur le terrain.
- ✓ La détection : La phase de détection pourrait être améliorée en cartographiant par exemple tous les lieux de confusion tels que les zones de corozal ou de fougères, ou en délimitant les zones prioritaires telles que les sommets de colline, chers aux Mayas. La détection automatisée serait très difficile à mettre en place à cause de la disparité des visualisations de chaque entité mais son intérêt pourrait être étudié plus en profondeur. Une analyse sur la répartition des points de sols permettrait également de voir les zones vides qui seraient susceptibles d'avoir des sites indétectés.
- ✓ L'exploration pourrait être également améliorée. L'installation d'un fond de carte type Bone map sur les GPS permettrait par exemple de mieux se repérer sur le terrain. S'équiper de tablette numérique serait plus onéreux mais permettrait de limiter le nombre de fiches à remplir et de travailler également sous la pluie.

Toutes ces améliorations sont plus ou moins importantes mais peuvent faciliter les travaux de détection. Tout dépend des besoins du laboratoire en termes d'investigation. La détection permet comme nous l'avons vu de détecter 90% des sites sur la zone test. Ces 90% sont largement suffisants à l'élaboration d'une carte représentant les entités et permettant de comprendre une

organisation globale de la cite d'El Pilar. Nous pouvons également nous intéresser plus en profondeur à la visibilité des PRU et SRU pour détailler ce pourcentage de sites visibles.

III.3 Unités de résidence et investissement de travail

Les unités de résidence sont calculées en fonction du LI (Labor investment : nombre d'heures de travail nécessaires à la réalisation d'un site). Un site comprend l'ensemble des structures qui forment une même unité (place et bâtiments). Le nombre de jours de travail est calculé pour chaque structure puis additionné afin de connaître celui au niveau de l'unité. Le nombre de jours dépend de la hauteur (on différencie bâtiment de plus et de moins de un mètre) et de la dimension de la structure (diagonale), puis de son type : bâtiment ou plateforme qui ne nécessite pas le même temps de réalisation¹⁸. Une unité de résidence primaire (PRU), se définit par un LI supérieur à 500 jours de travaux et une unité de résidence secondaire (SRU) par un LI inférieur à 500 jours. L'investissement de travail a donc pu être recalculé avec les mesures des sites anciennement connus (et donc pas toujours visibles sur la bone map), les sites explorés d'après la détection sur les rasters et les nouveaux sites découverts lors des différents travaux sur le terrain.

Au total, la phase terrain a révélé 165 résidences, 55% d'entre elles sont des unités de résidence primaire (91 PRU) et 45% des unités de résidence secondaire (74 SRU). Les 91 PRU sont très diversifiées, la plupart sont inférieures à 1000 jours de travaux et seulement 20% d'entre eux sont supérieures à 2500 jours de LI (cf. illustration 36). Les types de sites similaires qui sont donc le plus présents sur la réserve sont les SRU.

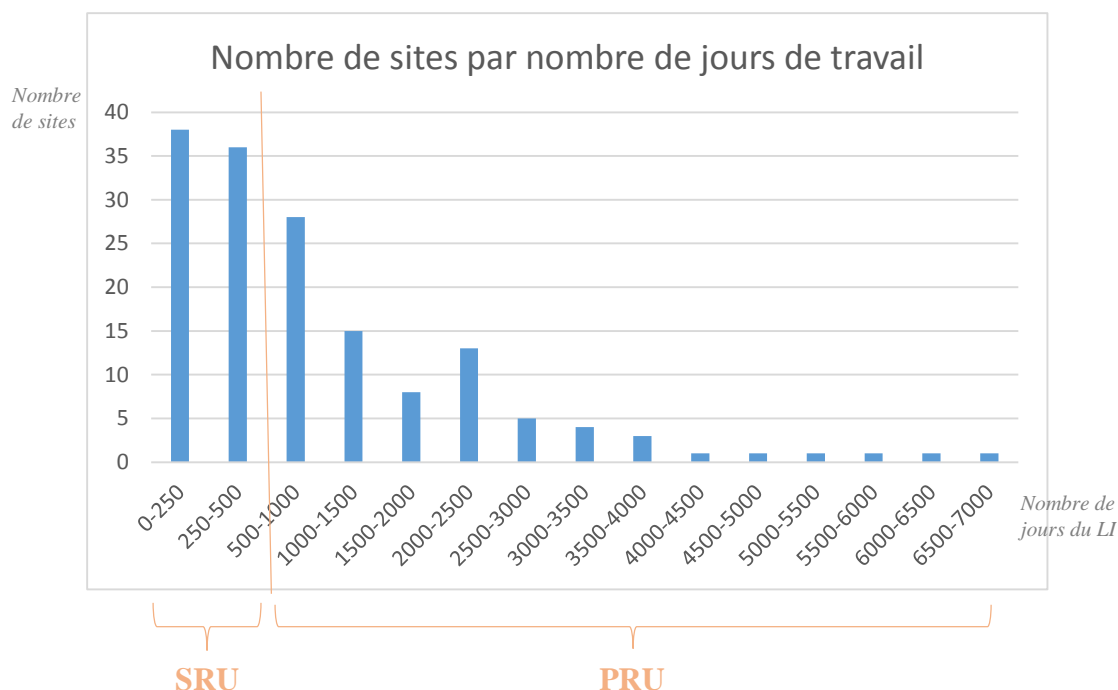


Illustration 36 - Répartition des sites en fonction du nombre de jour nécessaire à leur réalisation

¹⁸ Voir Annexe 18 : Critères de calcul Labor Investment

Le niveau de visualisation a été identifié sur chacun de ces points¹⁹, allant de 0, invisible à 5, clairement visible. Les résultats sont donnés dans le tableau 12 suivant :

Niveau de visualisation	0	1	2	3	4	5
Moyenne LI (j)	188	422	690	1172	2109	2833
Moyenne hauteur max (m)	0.5	0.7	1.0	1.4	2.6	2.6
Moyenne diagonale (m)	7	9	10	12	15	15
Moyenne longueur zone (m)	8	14	16	23	25	33
Moyenne nombre de structures	1	2	2	2	3	3
Nombre de sites	25	43	26	28	21	22

Tableau 12 - Niveau de visualisation en fonction du nombre de Labor investment

Le niveau de visualisation a donc clairement un lien avec le LI qui lui-même dépend des caractéristiques et dimensions du site. Plus ce dernier est fort, plus l'unité est visible. Sur les 165 sites, 25, donc 15%, ne sont pas visibles. Parmi eux, un seul PRU de 613 jours de travail (site 2H5-3). Celui-ci n'a pas été suffisamment atteint par les points du LiDAR pour être détectable, seulement 34 points au sol sur 100 m².

Il est également intéressant de voir que les unités de résidence de LI très faible (200 j) peuvent être autant visibles que des sites de LI très fort avec la même densité de points. La répartition des points sur la zone joue donc un rôle également important dans la détection.

Le niveau 1 est considéré comme visible car il a une forme suspecte, sur le terrain il a plus de chance de correspondre à un artefact ou un élément naturel mais il est toutefois à considérer dans la détection. Ainsi sur les 91 PRU, seulement un seul n'est pas visible et sur les 74 SRU, 24 ne sont pas visibles. Ainsi, 99% des PRU et 68% des SRU sont détectables. Dans la totalité, une quantité incroyable de sites sont visibles, 140 visibles sur 165 (85%).

¹⁹ Voir Annexe 19 : Table des points LI avec niveau de visualisation

III.4 Conclusions

Il n'est pas évident de caractériser un site type clairement identifiable, un site qui avec certaines caractéristiques est à coup sûr visible et identifiable. Dès lors que l'on passe en dessous d'un certain niveau d'hauteur (environ un mètre), beaucoup de facteurs entrent en jeu. La visualisation dépend de nombreuses caractéristiques, autant de celles des monticules (forme, dimensions, hauteur, pentes...) que de la forme du terrain (végétation, pente générale). Tous ces facteurs sont plus ou moins importants mais sont tous liés. La trajectoire de l'hélicoptère et la couverture végétale sont aussi à prendre en compte.

La quasi-totalité des PRU (99%), sites les plus importants sont identifiables. Les sites secondaires le sont aussi pour la plupart (68%). Seuls ceux de faible dimension et difficilement visibles également sur le terrain ne le sont pas avec le LiDAR. Il est un outil surpuissant en archéologie et surtout dans ce milieu difficilement pénétrable. Sachant que les recherches du laboratoire BRASS se concentrent sur l'organisation générale de la vie Maya, les sites identifiables avec le LiDAR devraient être suffisants (résidences, dépression, aguada et carrières). Ils permettent une compréhension globale de la zone. Une exploration sur la totalité des sites suspects permettrait d'identifier environ 85% des sites, et comme nous l'avons vu la quasi-totalité des PRU qui sont les plus importants à détecter car les Mayas passaient la plupart de leur temps dans ces unités.

Les obstacles à la détection des vestiges sont pour la plupart naturels. Les caractéristiques du terrain (couverture végétale, présence de corozo, fougères Pteridium ou arbres écroulés) peuvent engendrer des artefacts de visualisation. Il serait peut être intéressant de cartographier les zones de corozo, facteur le plus contraignant. Mais dans la finalité le nombre de structures découvertes reste le même, la phase d'exploration est seulement un peu plus longue.

Le pourcentage d'attente est aussi un facteur intéressant, un pourcentage supérieur à 50% a toujours été couronné d'un succès sur le terrain, il pourra donc être utilisé dans la suite des recherches pour avoir une idée de la chance de trouver un site sur chaque point. Malgré cela, même si le pourcentage est faible, une exploration est toutefois nécessaire car des structures ont été découvertes avec 20% d'attente. Ces attentes sont très adaptées à la détection des PRU mais pas aux structures isolées telles que des carrières.

Il s'est avéré d'après ces analyses et comme nous pouvions le penser que la bone map est la meilleure source de détection (57% des sites identifiés sont réellement culturels) mais les courbes de niveau sont également un outil puissant. Elles ont permis de détecter de nombreux sites qui n'étaient pas identifiés sur la bone map. Elles sont donc à prendre en compte pour maximiser le nombre de sites détectés malgré les nombreux artefacts de visualisation. La combinaison des deux augmente également les chances de trouver des vestiges.

Le LiDAR est nettement en train de changer la perception de l'ancienne civilisation Maya en démontrant à la fois l'anthropologie de son paysage et l'ampleur de ses établissements urbains. Il montre ses qualités dans sa rapidité d'exécution par rapport aux anciennes techniques et dans sa faculté à traverser la canopée. Cet outil est donc le plus adéquat pour le moment dans la cartographie des vestiges archéologiques sous la forêt tropicale et son application à une échelle plus grande permettrait sûrement de découvrir de nombreuses ruines ou cités insoupçonnées.

Conclusion personnelle

Ce TFE a été ma première expérience complètement autonome et indépendant. Evoluer dans un milieu qui n'a presque aucune connaissance de notre domaine cartographique et topographique peut s'avérer frustrant par moment mais amène à se poser beaucoup de questions et à tenter de rechercher les solutions adéquates.

M'intéressant à l'Histoire, cette expérience m'a permis de découvrir le monde très mystérieux des Mayas et de visiter des sites extraordinaires comme Tikal au Guatemala. Les Mayas étaient une civilisation très développée dans de nombreux domaines comme l'architecture et l'agriculture. Et dans cette nouvelle ère où l'on se rend compte de l'importance de l'environnement et de sa fragilité, nous devrions plus nous inspirer de l'expérience de nos prédécesseurs qui comprenaient la nature et la voyait comme un bénéfice.

De plus, ce travail permet de montrer à l'archéologie en milieu difficile la capacité exceptionnelle du LiDAR aérien. Il est l'un des outils les plus intéressants actuellement dans la détection des lieux d'accès restreint ou impossible. Le LiDAR terrestre a aussi son intérêt dans l'archéologie, il permet par exemple de modéliser les grottes préhistoriques et ainsi de les faire visiter virtuellement pour éviter leur dégradation.

Ce travail a été une expérience autant professionnelle qu'humaine. Quasiment coupé du monde, dans un pays avec une culture complètement différente où la vie n'est pas toujours facile, il m'a permis d'ouvrir les yeux sur notre confort de vie quotidien. Les relations avec les locaux, tels que les formidables gardes forestiers m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions et d'apprendre énormément sur la faune et la flore. J'ai essayé de leur donner autant que ce qu'ils m'ont transmis mais je crois que je leur suis grandement plus redevable... La gentillesse de ces gens et leur générosité alors que leurs conditions de vie sont si difficiles est extraordinaire. Ces leçons d'humanité sont pour moi des valeurs essentielles, biens différentes de celles que l'on peut voir chez nous, je ne les oublierai jamais et j'essaierai de les transmettre au maximum.

Bibliographie

Mémoires de recherche

BIHR Hugo. *Interprétation du LiDAR : les défis dans l'identification des anciens sites Mayas*. Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT, Le Mans : ESGT, 2013, 60p.

LARDILLEUX Juliette. *Mise en place d'un protocole dans la détection de site Mayas*. Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT, Le Mans : ESGT, 2014, 70p.

Articles de périodiques électroniques

CHASE Arlen F., CHASE Diane Z., WEISHAMPEL John F., DRAKE Jason B., SHRESTHA Ramesh L., SLATTON K. Clint, AWE Jaime J., CARTER William E.. *Airborne LiDAR, Archaeology, and the Ancient Maya Landscape at Caracol, Belize*. Journal of Archaeological Science, [en ligne], 2011, vol. 38, pp. 387-398. Disponible sur : <http://www.caracol.org/include/files/chase/ChaseEtAl2011.pdf>.

CHASE Arlen F., CHASE Diane Z., WEISHAMPEL John F. *The Use of LiDAR at the Maya Site 2 of Caracol, Belize . A Primer on Space Archaeology: In Observance of the 40th Anniversary of the World Heritage Convention*, SpringerBriefs in Archaeology 5, Springer Science+Business Media New York 2013
URL : <http://www.caracol.org/include/files/chase/CCW2013.pdf>

FORD Anabel, CLARKE Keith *Linking the Past and Present of the Ancient Maya : Lowland Land Use, Population Distribution and Density in the Late Classic Period*. Contribution to Oxford Handbook of Historical Ecology and Applied Archaeology, 2007, 48p

GEORGES-LEROY Murielle, BOCK Jérôme, DAMBRINE Etienne & DUPOUEY Jean-Luc. *Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye*. ArchéoSciences 35 | 2011,
URL : <http://archeosciences.revues.org/3015>

KOKALJ Žiga, ZAKŠEK Klemen & OŠTIR Krištof. *Application of Sky-view factor for the Visualisation of Historic Landscape Features in LiDAR-derived Relief Models*, 2011.
Disponible sur : <http://www.thefreelibrary.com/Application+of+sky-view+factor+for+the+visualisation+of+historic...-a0252190858>

PINGEL Thomas J., CLARKE Keith C. & McBRIDE William A. *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, pp. 21–30.
Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271613000026>

Support de cours

POLIDORI Laurent, *Introduction à la télédétection*.
Support de cours de l'ESGT, Le Mans, 2007. 21p

Présentations

KOKALJ Žiga, OŠTIR Krištof & ZAKŠEK Klemen. DEM Visualization Techniques for Archaeological Interpretation [en ligne], 2012.

Disponible sur : <http://iaps.zrc-sazu.si/en/svf#v> .

Sites web

ESP. Exploring Solutions Past – The Maya Forest Alliance, [en ligne].

Disponible sur : www.espmaya.org .

ESP. The El Pilar Forest Garden Network, [en ligne].

Disponible sur : www.mayaforestgardeners.org .

ISBER/MesoAmerican Research Center. Meso American Research Center, [en ligne].

Disponible sur : www.marc.ucsb.edu .

Liste des illustrations

Illustration 1 – Carte de situation de la réserve d'El Pilar	8
Illustration 2 - Description de la réserve d'El Pilar	10
Illustration 3 - Le Goniographe.....	11
Illustration 4 – Situation de la cité Maya Caracol.....	12
Illustration 5 - Coupes de la place Copal sur le LidAR et orthophoto	13
Illustrations 6- Photographie et schéma d'un monticule	15
Illustrations 7 – Photographie et schéma d'une carrière.....	15
Illustration 8- Schéma d'une terrasse	15
Illustration 9 - Schéma d'une plateforme	16
Illustrations 10 – Photographie et schéma d'une dépression.....	16
Illustration 11 - Représentation d'une aire de résidence primaire et de ses potagers	17
Illustration 12 - Schémas du SVF (Source : Kokalj 2012).....	20
Illustration 13 - Capture d'écran de la BM	20
Illustration 14 - Capture d'écran visualisation SIM.....	20
Illustration 15 – Capture d'écran visualisation SVF.....	20
Illustration 16 - Capture d'écran des CdN	20
Illustration 17 - Capture d'écrans des différents niveaux de visibilité pour chacune des visualisations ..	22
Illustration 18 - Diagramme du nombre de site visible dans les différentes visualisations	23
Illustration 19 – Coupe de 30 m de long sur 10 m de profondeur de la classification des points du LiDAR	25
Illustrations 20 - Visualisation d'un site sur la bone map et les courbes de niveau	27
Illustrations 21 - Visualisation d'une carrière sur la bone map et les courbes de niveau	28
Illustrations 22 - Visualisation d'une dépression sur la bone map et les courbes de niveau.....	28
Illustrations 23 - Visualisation de terrasses sur la bone map et les courbes de niveau	29
Illustration 24 - Situation de la zone à explorer	30
Illustration 25 - Deux monticules dans une zone de pente sur les courbes de niveau	30
Illustrations 26 - Niveau de visualisation de 1 à 5 sur la bone map.....	31
Illustration 27 - Trois monticules à proximité	31
Illustration 28 - Présence d'une place.....	31
Illustration 29 – Trajet quotidien entre BRASS et El Pilar.....	32
Illustration 30 – Photographie de Narcisso, un garde forestier, un jour d'exploration.....	34
Illustration 31 - Résultats de la phase d'exploration.....	36
Illustration 34 - Fougères Pteridium	38
Illustration 32 - Débris de corozal.....	38
Illustration 33 – Racines déterrées (arbre écroulé)	38
Illustration 35 - Zone vide sur les courbes de niveau.....	38
Illustration 36 - Répartition des sites en fonction du nombre de jour nécessaire à leur réalisation	45


Liste des tableaux

Tableau 1 - Récapitulatif du nombre de points dans chaque couche	14
Tableau 2 – Description des formes des sites	16
Tableau 3 - Pourcentage de points dans chaque couche	25
Tableau 4 – Statistiques sur la densité de points de sol sur 100 m ² pour chaque niveau de visibilité	26
Tableau 5 - Caractéristiques des sites détectables.....	39
Tableau 6 - Caractéristiques de trois sites de faible dimension	39
Tableau 7 - Caractéristiques de 3 sites de faible densité de points de sol.....	40
Tableau 8 - Caractéristiques des autres sites culturels	41
Tableau 9 - Caractéristiques des sites invisibles	42
Tableau 10 - Récapitulatif des résultats	42
Tableau 11 - Pourcentage d'attente en fonction du site découvert	43
Tableau 12 - Niveau de visualisation en fonction du nombre de Labor investment	46

Table des annexes

Annexe 1 : LIDAR PROJECT SUMMARY	54
Annexe 2: Réserve d'El Pilar sur la Bone Map	56
Annexe 3 : Réserve d'El Pilar sur la visualisation SIM.....	57
Annexe 4: Réserve d'El Pilar sur la visualisation SVF	58
Annexe 5 : Extrait des courbes de niveau	59
Annexe 6 : Carte des points identifiés sur la zone test d'après les courbes de niveau et Bone map	60
Annexe 7 : Table des attentes en pourcentage des points identifiés sur la bone map.....	61
Annexe 8: fiche de commentaires	64
Annexe 9 : Fiche de situation.....	65
Annexe 10 : Fiche de dessin	66
Annexe 11 : Tableau d'exploration.....	67
Annexe 12 : Mesures des points Exp de la bone Map	68
Annexe 13 : Mesures des points Exp des CdN	73
Annexe 14 : Carte de répartition des sites « identifiés » explorés	80
Annexe 15 : Table complète des sites découverts sur le terrain et invisibles sur la BM et les CdN	81
Annexe 16 : Carte de répartition des sites « invisibles » sur la BM et les CdN et découverts lors de l'exploration	82
Annexe 17 : Table des résultats de points des pourcentages d'attente	83
Annexe 18 : Critères calcul Labor Investment	86
Annexe 19 : Table des points LI avec niveau de visualisation	87

Annexe 1 : LIDAR PROJECT SUMMARY

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	

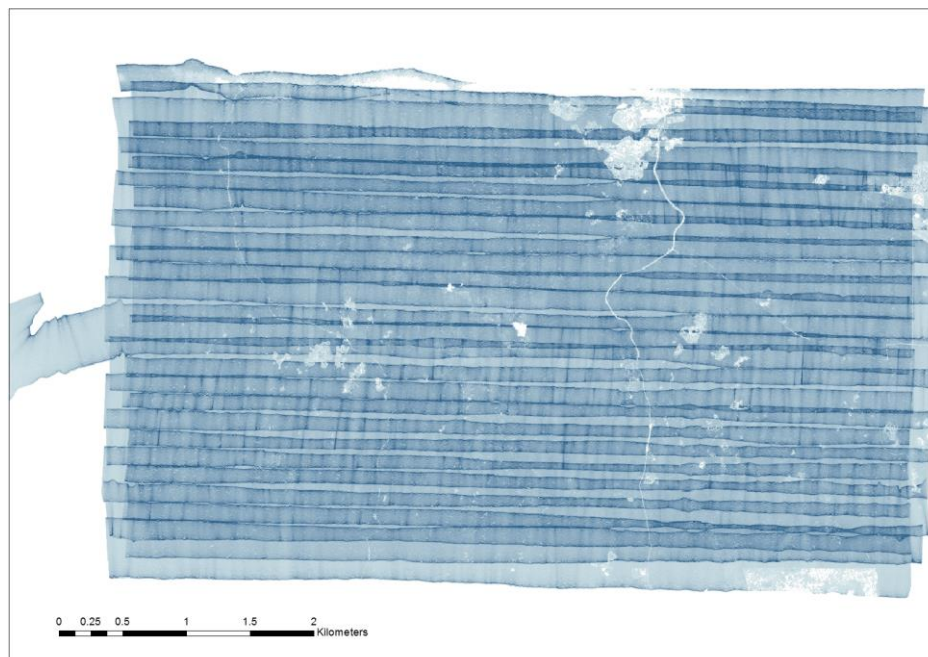
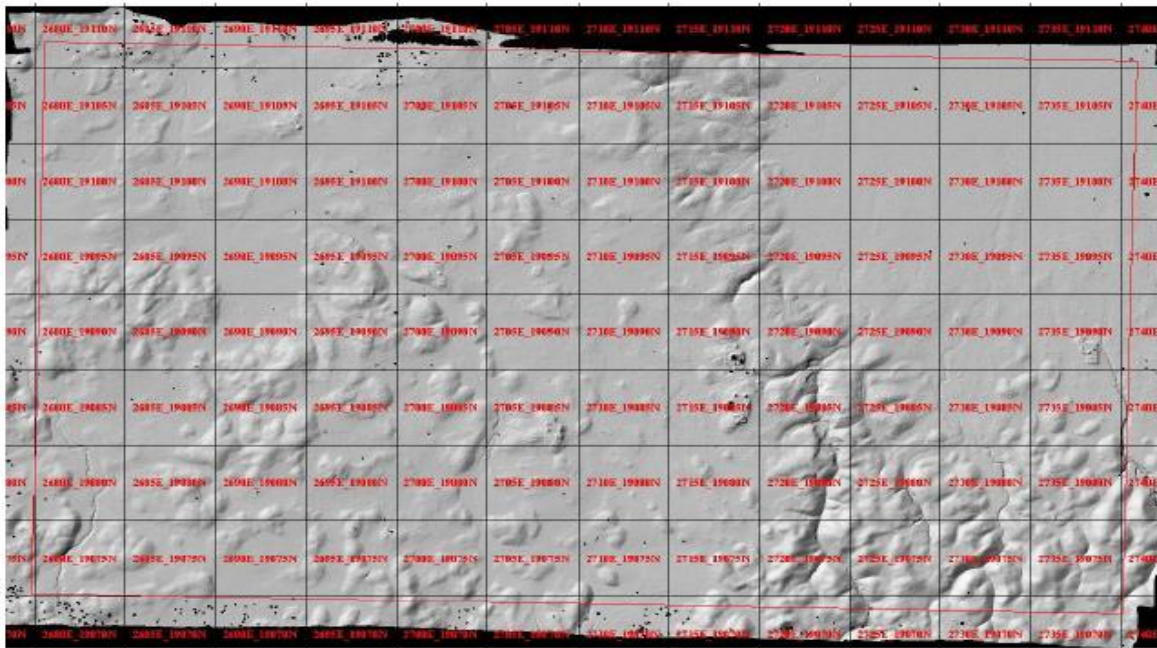
Deliverables

Preliminary Classified Point Cloud (LAS v1.2, ASPRS Classes)

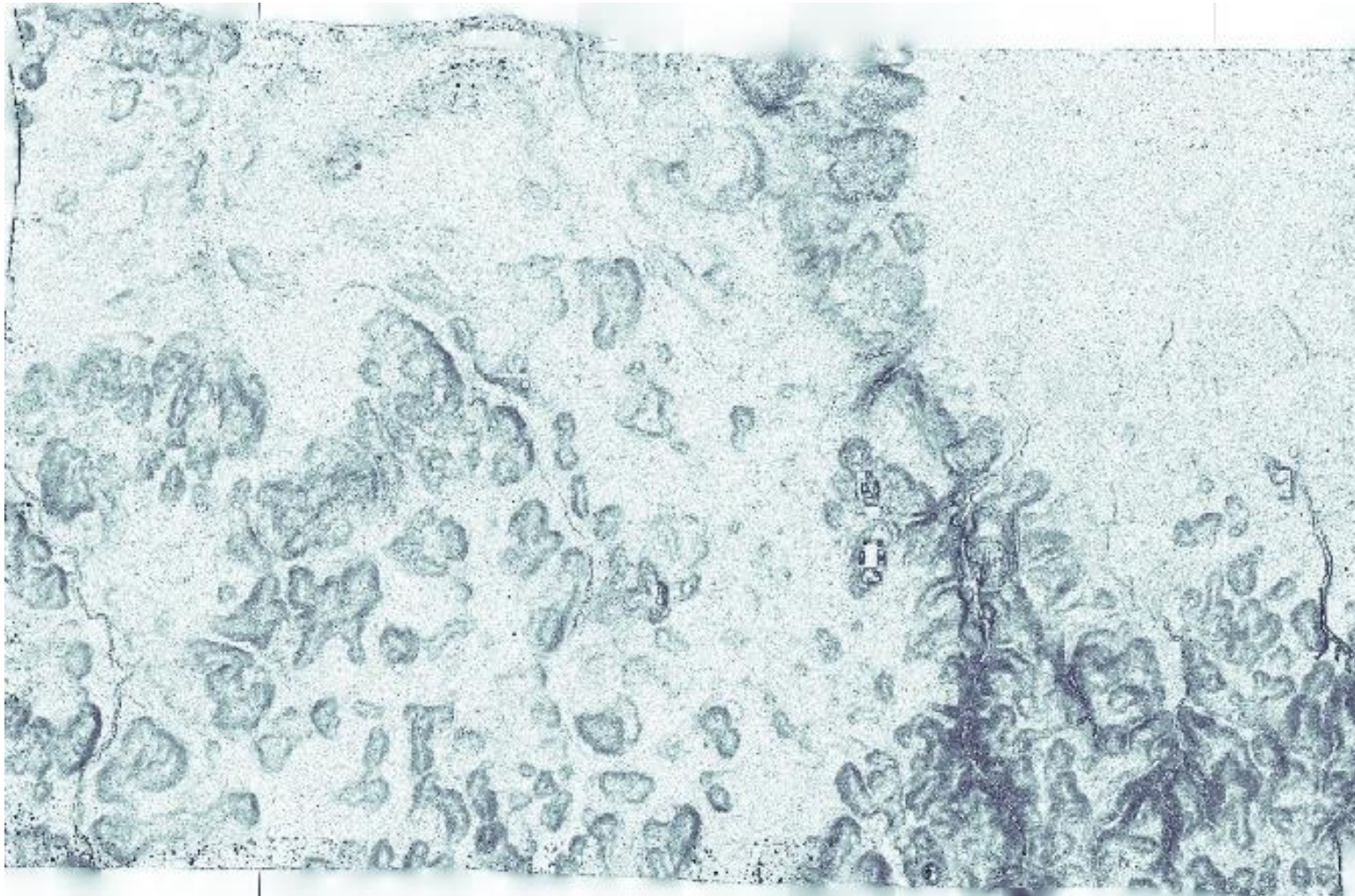
Hillshade Image (Geotiff) of the preliminary ground surface

Summary Produced: May 23, 2012

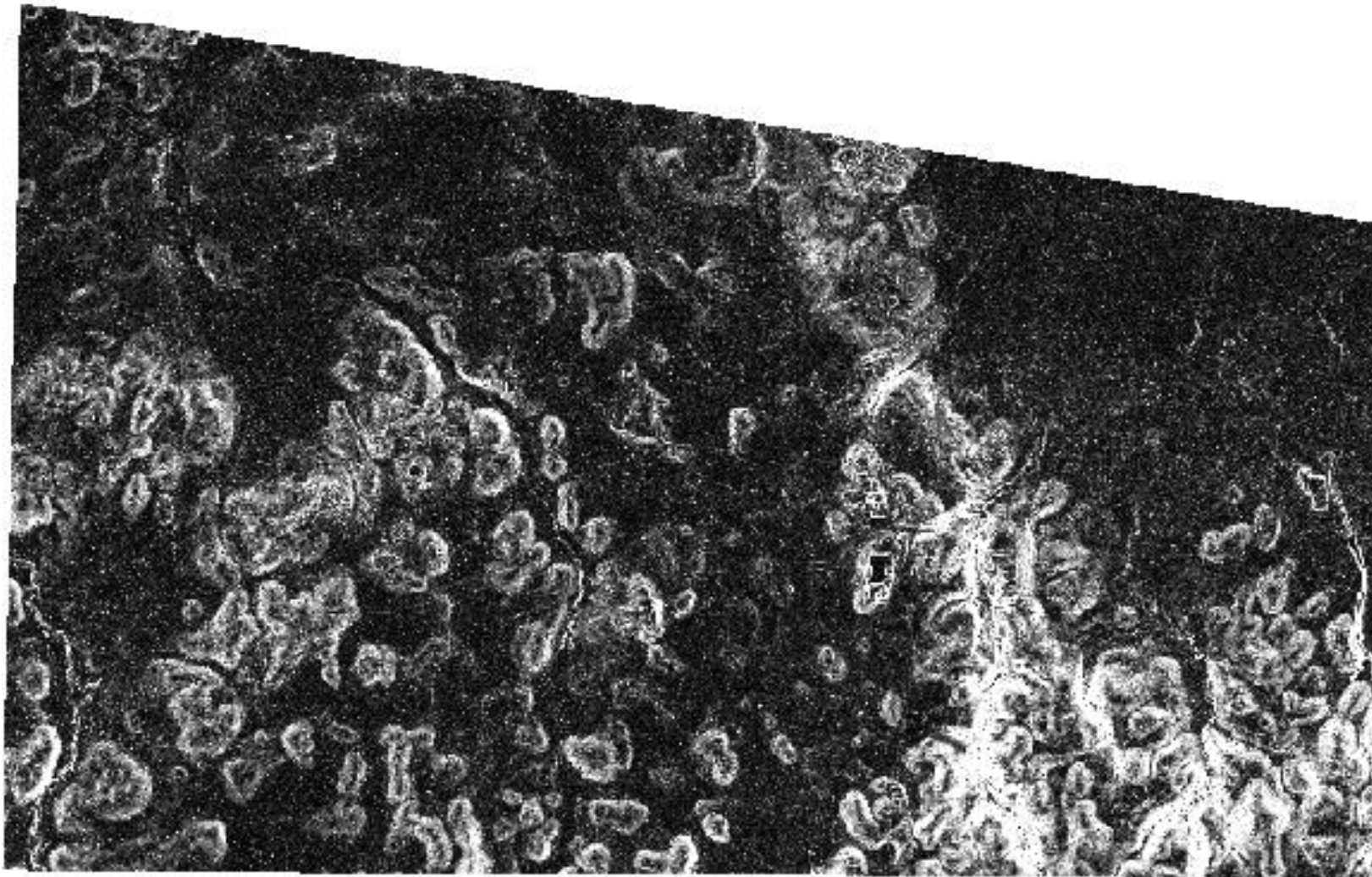
Preliminary Hill Shade ground surface with tiling index



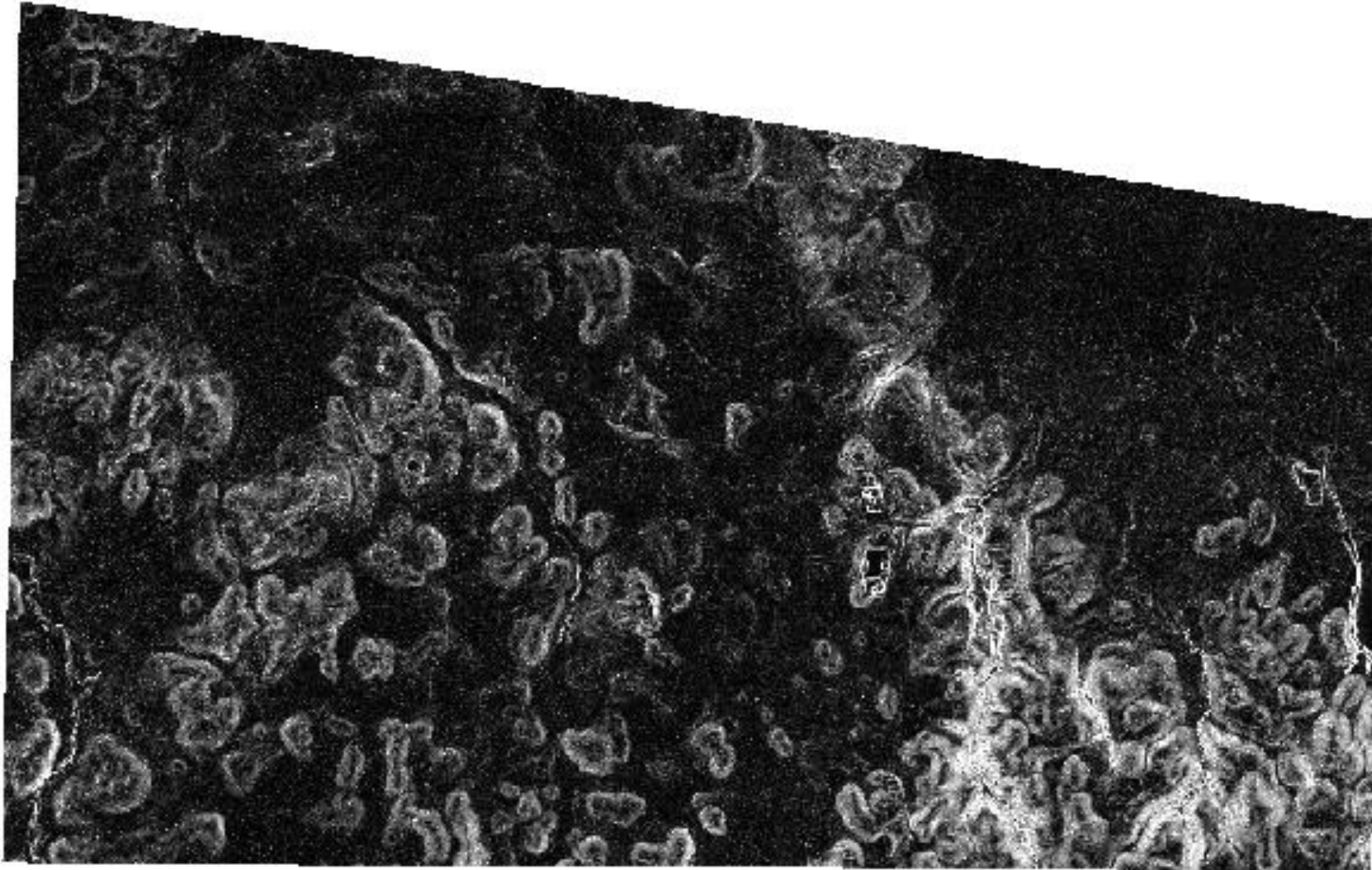
Annexe 2: Réserve d'El Pilar sur la Bone Map



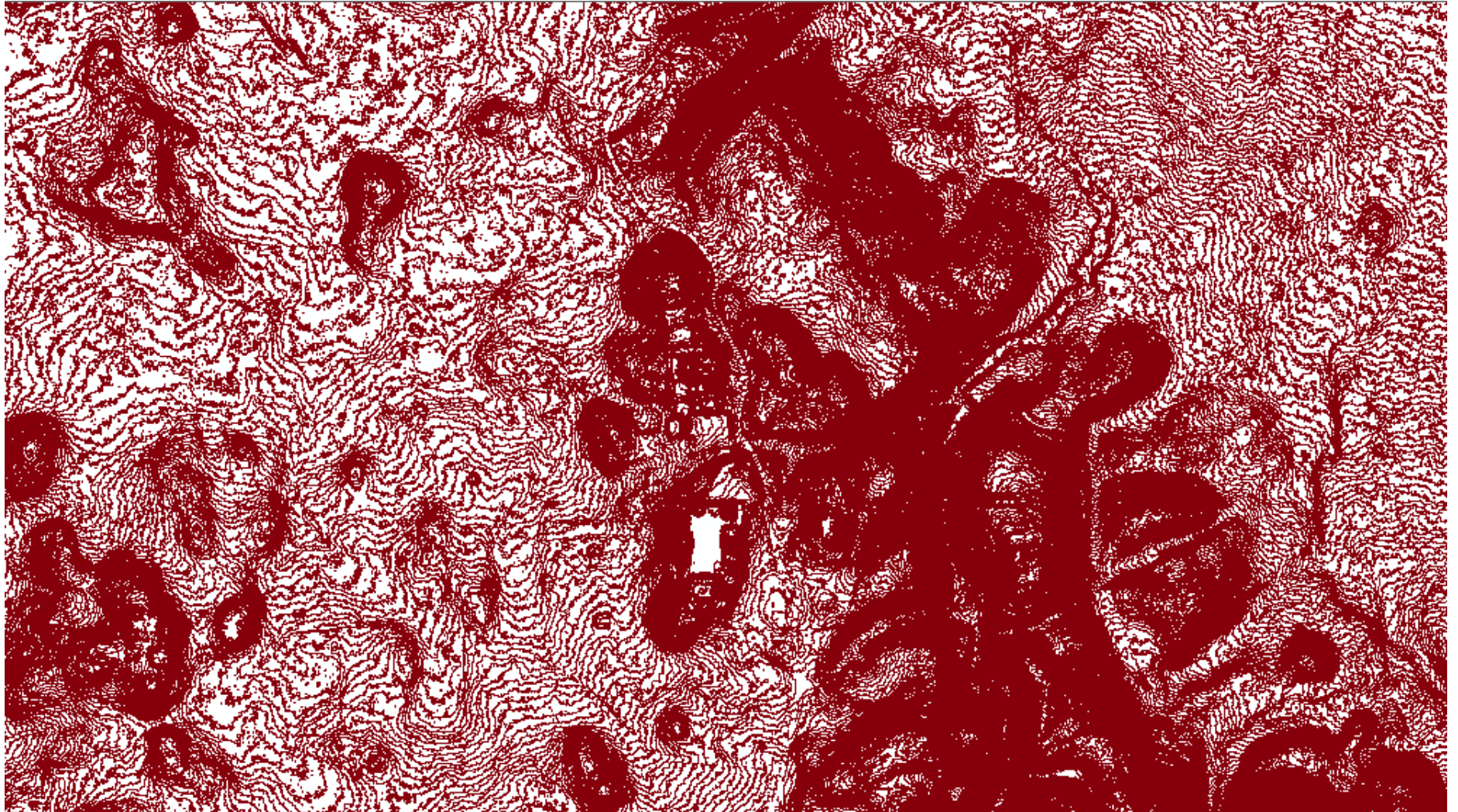
Annexe 3 : Réserve d'El Pilar sur la visualisation SIM



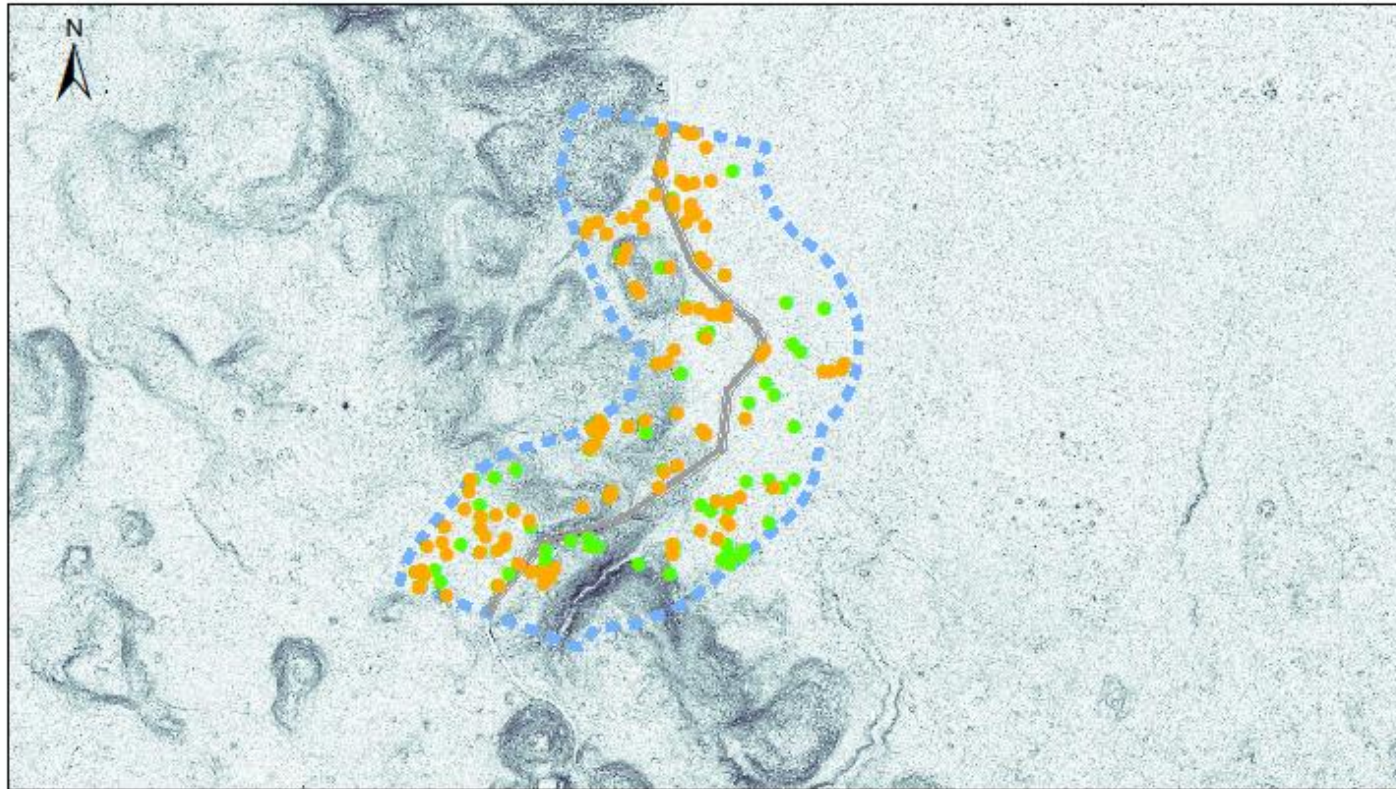
Annexe 4: Réserve d'El Pilar sur la visualisation SVF



Annexe 5 : Extrait des courbes de niveau



Annexe 6 : Carte des points identifiés sur la zone test d'après les courbes de niveau et Bone map



Légende

- Points courbes de niveaux
- Points Bone map
- Route
- Zone de 200m

Meso American Research Center, 2014
Carte réalisée par Gabriel Mordant

0 125 250 500 750 1,000
Meters

Annexe 7 : Table des attentes en pourcentage des points identifiés sur la bone map

Légende :

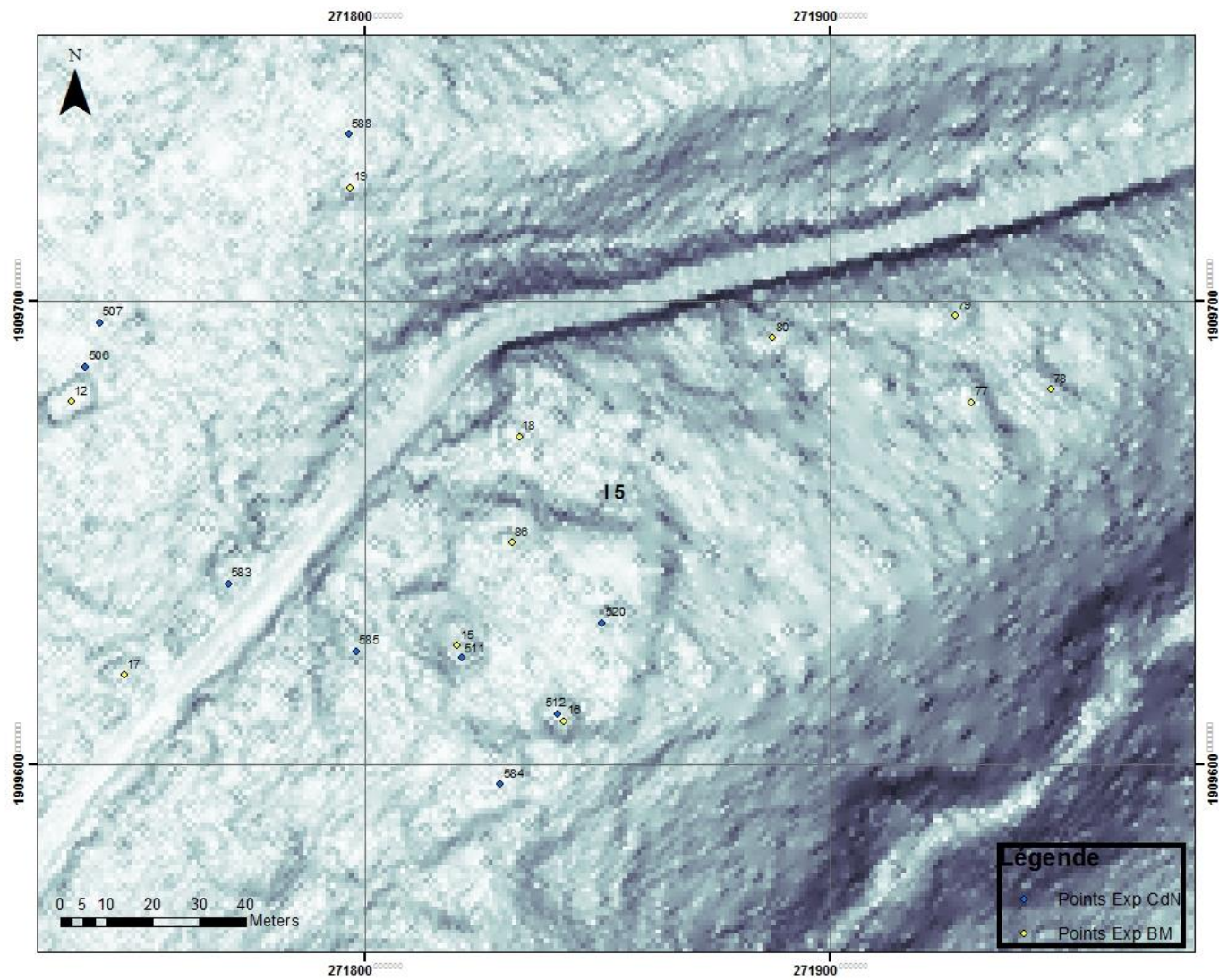
- FID : identité du point
- Level_visu : Intensité de visualisation du site classée de 1 à 5
- Nb_ptspro : Nombre de points dans un rayon de 200 m
- plaza : présence ou non de place
- Expectation : résultat du pourcentage d'attente expliqué

FID	level_visu (p=2.5/5) 1-->5	Nb_ptspro (p=1/5)	plaza (p=1.5/5) 0/1	Expectation (%)
1	2	3	1	70
2	4	3	1	90
3	2	1	0	27
4	2	1	0	27
5	2	1	0	27
6	1	1	0	17
7	1	1	0	17
8	1	1	0	17
9	2	1	0	27
10	3	1	0	37
11	4	1	0	47
12	5	1	0	57
13	2	1	0	27
14	2	1	0	27
15	5	3	1	100
16	5	3	1	100
17	2	1	0	27
18	2	2	1	63
19	2	1	0	27
20	2	1	0	27
21	3	1	0	37
22	3	1	0	37
23	3	2	1	73
24	5	2	1	93
25	5	2	1	93
26	3	1	0	37
27	1	1	0	17
28	5	3	0	70
29	4	1	1	77
30	3	1	0	37
31	4	3	1	90
32	4	3	1	90
33	4	3	1	90
34	2	1	0	27
35	3	2	0	43
36	2	2	0	33
37	1	2	0	23
38	1	2	0	23

FID	level_visu (p=2.5/5) 1-->5	Nb_ptspro (p=1/5)	plaza (p=1.5/5) 0/1	Expectation (%)
39	4	3	0	60
40	1	1	0	17
41	1	1	0	17
42	2	1	0	27
43	2	3	0	40
44	1	2	0	23
45	2	2	0	33
46	1	2	0	23
47	1	1	0	17
48	1	1	0	17
49	4	1	0	47
50	1	1	0	17
51	2	1	0	27
52	1	1	0	17
53	1	1	0	17
54	4	1	0	47
55	4	3	1	90
56	4	3	1	90
57	4	3	1	90
58	2	1	0	27
59	1	2	0	23
60	1	1	0	17
61	1	1	0	17
62	1	1	0	17
63	2	1	1	57
64	1	1	0	17
65	4	1	0	47
66	2	1	0	27
67	1	1	0	17
68	1	1	0	17
69	1	2	0	23
70	1	1	0	17
71	1	1	0	17
72	2	1	0	27
73	6	2	0	73
74	2	1	0	27
75	2	1	0	27
76	2	3	0	40
77	1	3	0	30
78	1	3	0	30
79	2	1	0	27
80	2	3	0	40
81	2	2	0	33
82	1	2	0	23
83	1	3	0	30
84	2	2	0	33
85	1	3	1	60
86	3	2	0	43
87	2	3	1	70

88	1	3	1	60
89	2	3	1	70
90	3	3	1	80

Annexe 9 : Fiche de situation



Annexe 10 : Fiche de dessin

El Pilar Field Survey form		Date :																																	
Chief _____	Crew _____	Flag <input type="checkbox"/>																																	
Destination <input style="width: 100px;" type="text"/>	Easting <input style="width: 100px;" type="text"/>	Northing <input style="width: 100px;" type="text"/>																																	
Grid <input style="width: 100px;" type="text"/>	GPS # <input style="width: 100px;" type="text"/>																																		
Sketch :		Canopy <input style="width: 40px;" type="text"/>	Understory <input style="width: 40px;" type="text"/>																																
<div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>		Terrain <input style="width: 40px;" type="text"/>																																	
		Vegetation																																	
		<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; height: 100px; width: 100%;"></div>																																	
Not to scale																																			
Mapping points	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">Description</th> <th style="width: 15%;">Points numbers</th> <th style="width: 25%;">Description</th> <th style="width: 15%;">Points numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>			Description	Points numbers	Description	Points numbers																												
Description	Points numbers	Description	Points numbers																																
Total mapping points :	_____																																		
Notes																																			

Annexe 12 : Mesures des points Exp de la bone Map

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	I4	1	M	1.4	0.5	12	7	3		3	36	F	13-May
2	I4	2	M	1.2	0.7	8	4	3		3	36	F	13-May
2	I4	3	N						FALLEN TREE			S	13-May
2	I4	4	B	1.6		7	3	2				S	13-May
2	I5	5	N	1		4	0.5	3	FALLEN TREE			F	3-May
2	I4	6	N						COROZAL			F	13-May
2	I4	7	N						COROZAL			F	13-May
2	I4	8	N						FALLEN TREE			F	13-May
2	I4	9	N						FALLEN TREE			F	13-May
2	I4	10	M	0.9	0.7	10	4	2	3 mounds	2	28	F	13-May
2	I4	11	M	1	1.2	12	8	2	ancient road	1	14	F	10-May
2	I5	12	D	1.2		11	7	2	Historic			F	3-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	I4	13	M	1	0.8	14	8	3	ancient road	1	16	F	10-May
2	H4	14	M	0.6	0.4	18	3	2	ancient road	1	18	F	10-May
2	I5	15	M	1.6	2.8	13	9	3		1	16	F	3-May
2	I5	16	M	1.5	1.4							F	3-May
2	I5	17	N	0.7		6	0.5	3	FALLEN TREE			F	3-May
2	I4	18	N						COROZAL			F	13-May
2	I5	19	M	1.2	0.9	7	3	2		3	22	S	5-May
2	I5	20	N						Top of stream			F	5-May
2	H5	21	M	1.3	1.7	12	7	3		2	18	F	5-May
2	H4	22	M	1.2	1.5	9	7	3		3	22	F	5-May
2	H4	23	M	0.6	0.7	6	4	2	3mounds	3	19	F	5-May
2	H5	24	M	3	5	18	10	3		2	38	S	13-May
2	H5	25	M	0.3	1.7	9	6	2		2	24	F	15-May
2	H5	26	M	0.4	2.5	5	4	2		2	24	F	15-May
2	H5	27	M	0.4	1.5	9	3	3		2	15	S	5-May
2	H4	28	N						FALLEN TREE			S	5-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	H5	29	D	1.8	1.2	16	7	3				F	15-May
2	H6	30	M	0.7	1.4	8	8	2		1	26	F	15-May
2	H6	31	N						COROZAL			S	15-May
2	H5	32	M	1.2	3	22	8	3		6	45	F	15-May
2	H5	33	M	2	3	30	10	3		6	45	F	15-May
2	H6	34	M	1.7	5	22	8	3		6	45	F	15-May
2	H5	35	Q						QUARRY			S	13-May
2	I6	36	M	2	1.7	10	5	3		2	26	S	23-May
3	H6	37	X									F	23-May
3	H1	38	N						COROZAL			F	23-May
3	H1	39	M	1.7	1.6	12	9	3		2	28	F	23-May
2	H6	40	B	0.5		6	4	2	NATURAL			F	23-May
2	H1	41	X									F	23-May
2	I6	42	N						RUPTURE PENTE			S	23-May
3	I1	43	Q	1.6								F	23-May
3	I1	44	N						FALLEN TREE			F	23-May
3	H1	45	M	1.2	1.1	10	5	2		1	11	F	23-May
3	H1	46	X						NOTHING			F	23-May
3	H1	47	M	0.7	0.6	8	7	2		1	11	F	23-May
3	H1	48	N									F	

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	G6	49	M	1.7	3	14	10	3		1	17	S	15-May
3	G1	50	M	0.6	0.2	8	5	1		2	22	F	22-May
3	G1	51	M	0.6	0.4	8	4	1		2	25	F	22-May
3	G1	52	M	1.2	1.1	12	8	2		1		F	22-May
3	G2	53	N									F	22-May
2	G6	54	M	3	3.4	22	10	3		1	24	S	15-May
2	G6	55	M	1.6	1.5	18	10	3		2	21	F	15-May
2	G6	56	M	1.6	1.5	18	10	3		2	21	F	15-May
2	G6	57	D	1.5		12	12	2				F	15-May
3	G2	58	M	1.6	1.5	12	6	2		2	28	F	22-May
3	F1	59	N									F	22-May
3	F1	60	N						COROZAL			F	19-May
3	E6	61	N									F	22-May
3	F1	62	N									F	22-May
2	F6	63	N						TIGER GRASS			S	19-May
2	F6	64	N						FALLEN TREE			S	19-May
2	F6	65	D	4		15	12	3	WATER HOLE			S	19-May
2	E6	66	M	0.9	0.1	7	2	1		1	7	F	20-May
2	E6	67	N						FALLEN TREE			F	20-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
3	F1	69	N									F	22-May
2	F6	70	N						COROZAL			F	15-May
2	G6	71	N						FALLEN TREE				15-May
2	H6	72	N						COROZAL			S	15-May
2	H5	73	D	2	2	8	6	3				F	15-May
3	I1	74	M	0.6	0.5	6	2	1		1	6	F	23-May
2	I6	75	N						FALLEN TREE			S	23-May
2	I5	76	Q	2		20		3		1	15	S	5-May
2	I5	77	Q	2		15		3		1	13	S	5-May
2	I5	78	N									S	5-May
2	I5	79	Q	2	1	15	3	3		2	26	S	5-May
3	I1	80	M	0.8	0.5	6	3	2		3	37	F	23-May
3	I1	81	M	1	0.8	6	3	2		3	37	F	23-May
3	I1	82	N						FALLEN TREE			F	23-May
3	I1	84	M	1.6	1.2	9	6	3		3	37	F	23-May
2	H5	86	M	4	6	20	12	3		2	38	S	13-May
2	A4	87	M	1.5	1.8	10	8	3		3	45	F	13-May
2	A4	88	M	1.3	3	18	10	3		3	45	F	13-May
9	A4	89	M	4	3	20	7	3		3	45	F	13-May
2	I4	90	M	0.6	0.7	8	6	1		3	36	F	13-May

Annexe 13 : Mesures des points Exp des CdN

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	I4	500	N						COROZAL				F	13-May
2	I4	501	M	0.9	0.7	10	4	2	2 mounds	O	2	28	F	13-May
2	I4	502	N						COROZAL				F	13-May
2	I4	503	M	1.5	1.5	7	5	3	3 mounds	O	3	14	F	10-May
2	I4	504	X						NATURAL SLOPE				S	13-May
2	I4	505	B	1.1		9	9	2	soil from depres				F	3-May
2	I5	506	N					1	COROZAL				F	3-May
2	I5	507	N					1	COROZAL				F	3-May
2	I4	508	B	1.7	0.8	14	8	3	ancient road	O	1	16	F	10-May
2	I4	509	M	0.5	0.5	12	3	1	churt mound	I	1	14	F	3-May
2	H5	510	M	1	1	8	5	2		O	2	18	F	5-May
2	I5	511	M	1.6	2.8	13	9	3		O	1	16	F	3-May
2	I5	512	M	1.5	1.4								F	3-May
2	I4	513	N						COROZAL				F	13-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	I4	514	X						FLAT AREA				F	13-May
2	I4	515	N						COROZAL				F	13-May
2	I4	516	N						COROZAL				F	13-May
2	H4	517	M	1	1	7	7	2		O	3	22	F	5-May
2	H4	518	M	0.4	0.9	7	5	2	4 mounds	O	3	17	F	10-May
2	I5	519	X						Nothing				F	5-May
2	I6	520	M	2	1.7	10	5	3			2	26	S	23-May
2	I1	521	M	1	0.9	7	4	2			2	16	F	23-May
3	I1	522	N						FALLEN TREE				F	23-May
3	H6	523	X										F	23-May
3	I1	524	X										F	23-May
2	H1	525	X						FLATNESS				F	23-May
3	H1	526	N						COROZAL				F	23-May
3	H1	527	M	1.7	1.6	12	9	3			2	28	F	23-May
2	H5	528	M	2.5	0.5	12	10	3		O	2	30	S	13-May
2	H6	529	M	0.7	1.4	8	8	2		O	1	26	F	15-May
2	H5	530	M	4	6	20	12	3		O	2	38	S	13-May
2	H5	531	D	2	2	8	6	3					F	15-May
2	H5	532	D	1.8	1.2	16	7	3					F	15-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	H5	533	M	0.3	1.7	9	6	2		O	2	24	F	15-May
2	H5	534	M	0.4	2.5	5	4	2		O	2	24	F	15-May
2	H5	535	M	2	0.6	12	10	3		O	2	32	F	13-May
3	G1	536	M	0.6	0.4	10	4	2			1		F	22-May
2	G6	537	N						FALLEN TREE					15-May
2	G6	538	M	3	3.4	22	10	3		0	1	24	S	15-May
2	G6	539	X											15-May
2	G6	540	M	1.6	1.5	18	10	3		L	2	21	F	15-May
2	F1	541	N						COROZAL				F	15-May
2	F6	542	Q	0.6									S	19-May
2	F6	543	B	0.5		6	4	2					S	19-May
2	F6	544	N						TIGER GRASS				S	19-May
2	F6	545	D	4		15	12	3	RIVIERE				S	19-May
2	F6	546	D	1.7		7	5	3	RIVIERE				S	19-May
2	D6	547	M	0.4	0.5	6	3	1		0	1	7	F	20-May
2	F6	548	M	0.9	0.1	7	2	1		O	1	7	F	20-May
2	E6	549	B	0.5		8							F	20-May
2	E6	550	X						FLAT AREA				F	20-May
2	E6	551	N						COROZAL				F	20-May

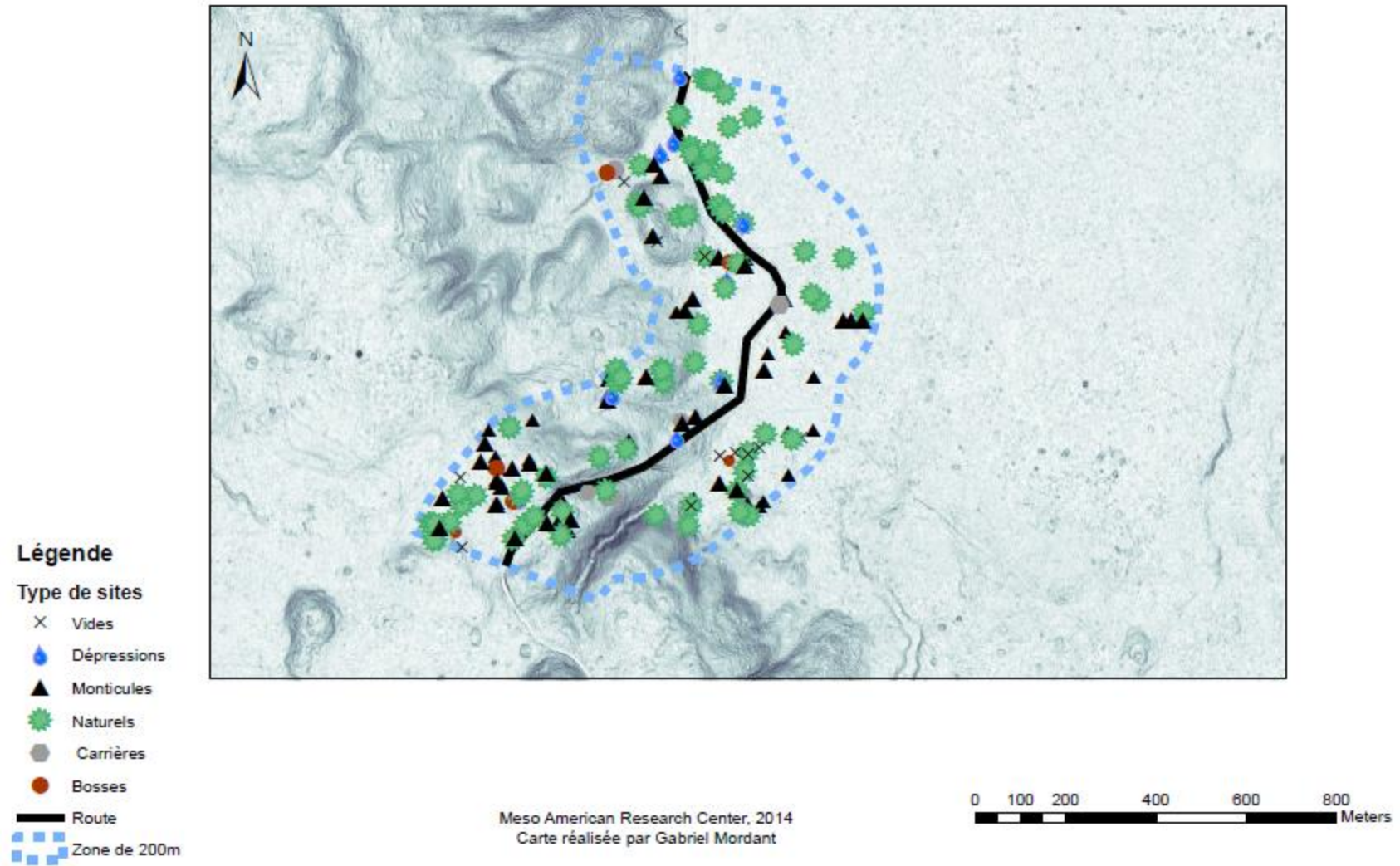
Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	F6	552	X						FLAT AREA				S	19-May
2	F6	553	D	1.8		5	3	3	RIVIERE				S	19-May
2	F6	554	N						TIGER GRASS				S	19-May
2	F6	555	N						COROZAL				F	15-May
3	F1	556	N						COROZAL				F	19-May
2	F6	557	N						COROZAL				F	19-May
2	F1	558	N						COROZAL				F	19-May
2	E6	559	N						FALLEN TREE				F	20-May
2	E6	560	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	561	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	562	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	563	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	564	D	0.6		4	3	1		0	1	5	F	20-May
2	E6	565	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	566	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	567	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	568	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	569	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	570	M	0.5	0.3	6	3	1		0	1	7	F	20-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	D6	571	N						COROZAL				F	20-May
2	D6	572	N						COROZAL				F	20-May
2	D6	573	N						COROZAL				F	20-May
2	D6	574	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	575	N						COROZAL				F	20-May
2	E6	576	N						COROZAL				F	20-May
2	H5	577	M	2	3	30	10	3		L	6	45	F	15-May
2	H5	578	M	1.2	3	22	8	3		L	6	45	F	15-May
2	H6	579	M	1.7	5	22	8	3		O	6	45	F	15-May
2	H5	580	M	1.8	4.5	12	20	3		L	6	45	F	15-May
2	H5	581	M	3	5	18	10	3		O	2	38	S	13-May
2	A4	582	M	1.3	3	18	10	3		O	3	45	F	13-May
2	A4	583	M	1.5	1.8	10	8	3		O	3	45	F	13-May
2	I5	584	N	0.7		3	1.5	3	FALLEN TREE				F	3-May
2	I5	585	D	0.5		6	4						F	3-May
2	I5	586	M	0.5	1.4	10	9	1		O	1	14	F	3-May
2	I4	587	N						COROZAL				F	13-May
2	I4	588	N						COROZAL				F	13-May
2	I5	589	M	0.5	0.7	6	2	2		O	1	6	F	5-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
2	H4	590	M	0.9	0.7	12	6	2	mound	O	1	13	F	10-May
2	I4	591	B	1	1.2	12	8	2	ancient road	O	1	14	F	10-May
2	I5	592	N	1		4	0.5	3	FALLEN TREE				F	3-May
2	H5	593	M	1.4	1.5	12	8	3		O	2	39	S	13-May
2	H5	594	M	1.7	2	14	7	3		O	2	39	F	13-May
2	H5	595	Q						QUARRY				S	13-May
2	H6	596	N						COROZAL				S	15-May
2	H6	597	M	1.7	3	14	10	3		O	1	17	S	15-May
2	H6	598	M	1.7	2.5	14	8	3		O	2	27	F	15-May
2	H6	599	M	1.9	2.7	15	8	3		L	2	27	F	15-May
2	H6	600	X						FLAT AREA				F	15-May
2	F6	601	N						TIGER GRASS				S	19-May
2	F6	602	N						COROZAL				F	15-May
2	F6	603	N						COROZAL				F	15-May
2	F6	604	N						COROZAL				F	15-May
2	F6	605	N						COROZAL				F	15-May
3	G1	606	B	0.4	0.3	4	2	1	NATURAL				F	22-May
3	G1	607	B	0.7	0.3	10	4	2	NATURAL				F	22-May
3	G2	608	M	1.6	1.5	12	6	2		O	2	28	F	22-May

Seg	Grid	Exp pts	Desc	H1 (m)	H2 (m)	Length (m)	width (m)	slope	Notes	Type struc	Nbre struc	Long ZONE	TERRAIN	date
3	G1	609	X						FLAT AREA				F	22-May
3	G1	610	M	0.5	0.4	6	3	1		O	2	28	F	22-May
3	G1	611	X						FLAT AREA				F	22-May
3	H1	612	X						FLATNESS				F	22-May

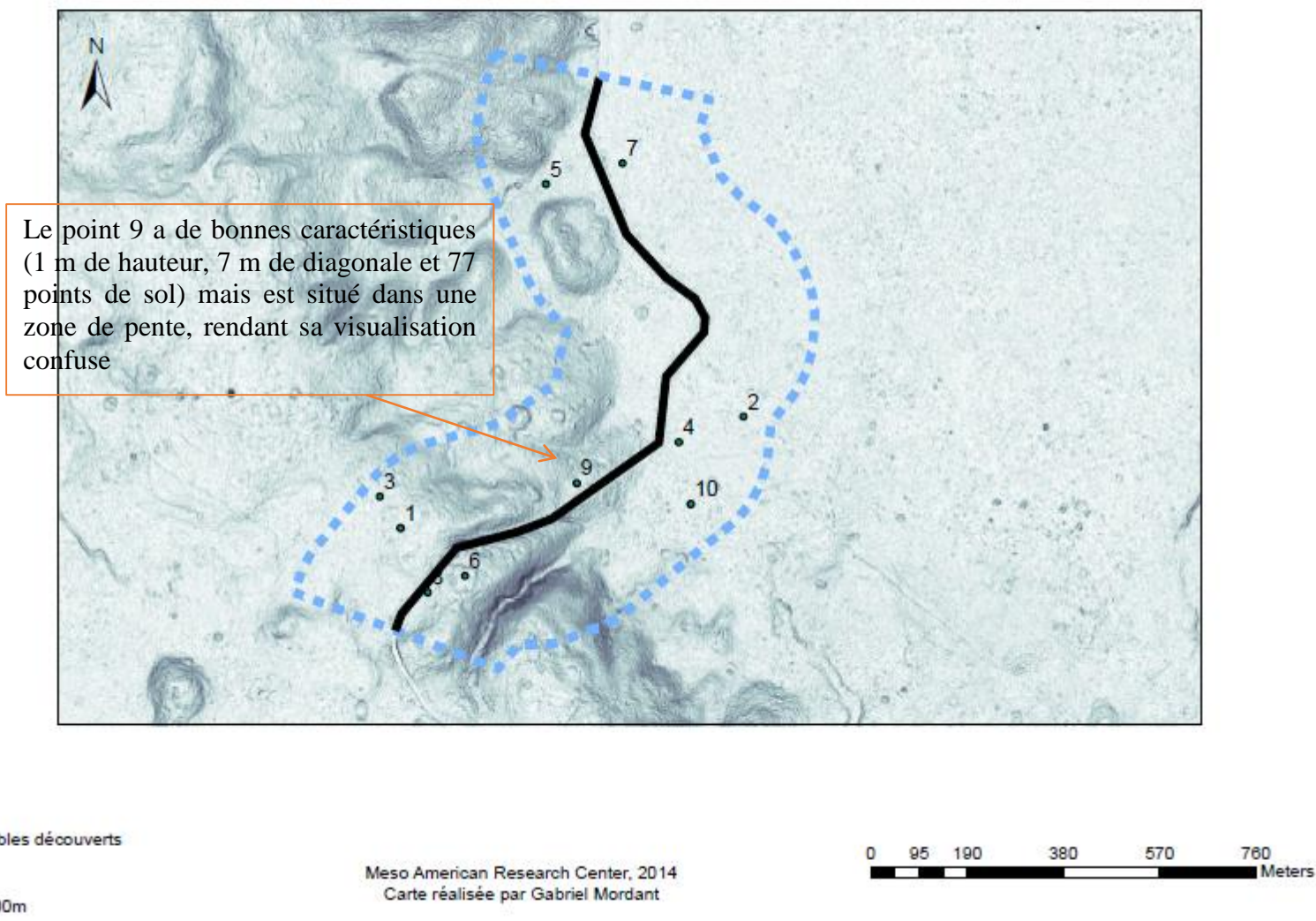
Annexe 14 : Carte de répartition des sites « identifiés » explorés



Annexe 15 : Table complète des sites découverts sur le terrain et invisibles sur la BM et les CdN

Exp pts	H1 (m)	H2 (m)	Hauteur max	Length (m)	width (m)	Diagonale monticule	pente	terrain	density (100m2)
1	0.3	0.2	0.3	4	2	4	1	F	27
2	0.3	0.1	0.3	10	2	10	1	F	45
3	0.2	0.2	0.2	5	3	6	1	F	34
4	0.3	0.1	0.3	4	3	5	1	F	42
5	0.4	0.2	0.4	5	2	5	1	F	57
6	0.3	0.3	0.3	5	2	5	1	F	28
7	0.3	0.2	0.3	3	1	3	1	F	69
8	0.4	0.1	0.4	4	2	4	1	F	77
9	1	0.4	1	6	3	7	2	S	77
10	0.4	0.2	0.4	3	2	4	1	F	35

Annexe 16 : Carte de répartition des sites « invisibles » sur la BM et les CdN et découverts lors de l'exploration



Annexe 17 : Table des résultats de points des pourcentages d'attente

Légende :

- FID : identité du point
- Level_visu : Intensité de visualisation du site classée de 1 à 5
- Nb_ptspro : Nombre de points dans un rayon de 200 m
- plaza : présence ou non de place
- Expectation : résultat du pourcentage d'attente expliqué

After Desc	level_visu (p=25/5) 1-->5	Nb_ptspro (p=1/5)	plaza (p=15/5) 0/1	Expectation (%)
B	2	1	0	27
Q	2	1	0	27
M	5	3	1	100
M	1	1	0	17
N	1	1	0	17
F	2	1	0	27
M	1	1	0	17
M	4	1	0	47
M	2	1	0	27
M	2	1	0	27
M	2	1	0	27
M	2	2	0	33
M	4	1	1	77
M	4	1	0	47
D	6	2	0	73
D	5	3	0	70
M	5	3	1	100
M	2	1	0	27
M	4	1	0	47
M	4	3	1	90
N	3	1	0	37
N	2	1	0	27
M	5	2	1	93
F	1	1	0	17
M	3	1	0	37
M	1	1	0	17
M	2	1	0	27
D	4	3	1	90
N	1	1	0	17
N	1	1	0	17

After Desc	level_visu (p=25/5) 1-->5	Nb_ptspro (p=1/5)	plaza (p=15/5) 0/1	Expectation (%)
F	1	1	0	17
N	2	1	1	57
D	4	1	0	47
M	4	3	1	90
F	1	1	0	17
N	1	1	0	17
N	1	1	0	17
N	1	1	0	17
N	1	2	0	23
N	1	2	0	23
M	2	1	0	27
N	1	1	0	17
M	5	2	1	93
M	4	3	0	60
M	2	1	0	27
N	1	1	0	17
M	3	1	0	37
M	2	2	0	33
X	1	2	0	23
M	3	2	1	73
N	1	2	0	23
X	1	2	0	23
X	1	1	0	17
B	1	1	0	17
M	3	2	0	43
M	2	3	1	70
M	3	1	0	37
M	2	2	0	33
F	1	2	0	23
N	1	3	0	30
T	2	3	0	40
F	1	2	0	23
M	3	1	0	37
N	2	1	0	27
F	2	1	0	27
F	2	1	0	27
F	2	1	0	27
D	5	1	0	57
M	2	3	1	70
M	4	3	1	90

After Desc	level_visu (p=25/5) 1-->5	Nb_ptspro (p=1/5)	plaza (p=15/5) 0/1	Expectation (%)
N	1	3	1	60
M	2	3	0	40
Q	2	1	0	27
N	1	3	0	30
Q	2	3	0	40
Q	1	3	0	30
N	2	1	0	27
M	2	2	1	63
M	2	3	1	70
F	1	1	0	17
M	2	2	0	33
M	1	3	1	60
M	3	3	1	80
M	4	3	1	90
M	4	3	1	90
M	4	3	1	90
F	1	1	0	17
F	2	1	0	27
N	2	1	0	27
N	1	1	0	17

Annexe 18 : Critères calcul Labor Investment

structure height low	
Diagonal (m)	Labor (h)
2	29
3	45
4	66
5	84
6	108
7	135
8	165
9	199
10	236
11	273
12	312
13	345
14	398
15	443
16	490
17	540
18	593
19	649
20	708
21	769
22	832
23	897
24	964
25	1031
26	1102
27	1177
28	1278
29	1363
30	1448
32	1618
35	1790
37	2048
40	2260
42	2572
54	3882

structure height high	
Diagonal (m)	Labor (h)
2	97
3	147
4	200
5	251
6	307
7	365
8	425
9	487
10	549
11	613
12	679
13	747
14	817
15	887
16	959
17	1033
18	1109
19	1187
20	1267
21	1349
22	1432
23	1516
24	1601
25	1688
26	1778
27	1869
28	1917
29	2055
30	2193
32	2390
33	2480
35	2660
37	2842
42	3436
48	4186
52	4940

Plaza	
Diagonal (m)	Labor (h)
8	115
10	160
12	205
14	251
15	276
16	300
17	325
18	354
19	382
20	415
21	451
22	482
23	512
24	558
25	597
26	640
27	681
28	720
29	763
30	806
31	851
32	892
33	925
34	985
35	1031
36	1084
37	1132
38	1189
39	1240
40	1295
41	1350
42	1406
43	1475
44	1524
45	1584
46	1644
47	1705
48	1770

Annexe 19 : Table des points LI avec niveau de visualisation

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
9D2-G	45	0.5	3	3	1	31	0
6A5-1	66	0.55	4	0	1	190	0
9A4-9	66	0.4	4	4	1	51	0
9F1-1	66	0.5	4	4	1	70	0
2I5-3	84	0.7	5	5	1	35	0
9A3-11	84	0.5	5	5	1	19	0
9F4-6	84	0.5	5	5	1	26	0
9F5-3	84	0.46	5	0	1	53	1
2I4-2	90	0.6	3	10	2	82	0
2E6-2	108	0.5	6	14	1	27	0
9A4-7	108	0	6	6	1	34	1
9C2-1	108	1	6	6	1	29	1
9E3-11	108	0.25	6	6	1	58	1
9E5-2	108	0.5	6	6	1	116	0
9F4-2	108	0.3	6	6	1	20	2
9F5-2	108	0.44	6	6	1	157	2
9F3-3	132	0.5	4	13	2	57	1
3H1-2	135	0.4	7	7	1	33	0
6A3-3	135	0.6	7	7	1	56	0
9A5-1	135	0.3	7	7	1	24	0
9A6-2	135	0.1	7	11	1	30	1
9B4-1	135	0.4	7	7	1	49	2
9B6-1	135	0.5	7	7	1	54	0
9D4-2	135	0.75	7	0	1	67	1
9D5-3	135	0.1	7	7	1	43	1

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
9B4-2	165	0.5	8	8	1	43	1
9D1-1	165	0.7	8	8	1	61	1
9F5-4	165	0.63	8	8	1	103	2
6B6-1	181	0.3	4	8	1	1536	0
2H4-4	192	0.6	6	10	2	31	0
9A6-1	199	0.1	9	15	1	16	1
9E3-4	199	0.4	9	9	1	103	3
9F2-3	219	0.7	7	11	2	32	1
3F1-1	236	0.1	10	10	1	27	1
3H1-4	236	0.7	10	10	1	116	3
9A4-5	236	0.2	10	10	1	30	1
9E6-7	236	0.54	10	10	1	69	1
9D4-4	251	0.2	5	0	1	93	1
3I1-1	270	0.6	7	12	2	37	0
2E6-1	273	0.5	11	11	1	59	0
2F6-1	273	0.5	11	11	1	120	1
9F4-8	273	0.8	11	11	1	68	1
9F5-1	273	0.8	11	11	1	129	2
3G1-3	312	0.6	12	12	1	74	1
9F4-5	313	0.8	6	12	1	19	1
2I5-7	316	0.6	4	12	2	61	0
9B3-3	320	0.8	10	11	2	68	4
6A3-6	324	0.6	6	18	4	32	1
9F2-4	324	0.9	6	20	3	65	3
9F2-1	339	0.8	11	16	2	64	3
6B6-4	340	0.1	7	12	1	381	1
2E6-3	345	0.5	13	13	1	59	0
2I5-6	345	0.5	13	13	1	26	0
9F2-8	351	0.6	7	18	3	47	1
9F3-1	357	0.5	11	13	2	89	1

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
2I5-5	365	1.4	7	7	1	40	1
9F3-6	371	0.3	10	14	2	57	2
9E2-1	378	0.85	12	16	2	229	4
9F2-5	384	0.5	8	21	3	74	1
9F2-9	396	0.8	8	14	3	45	1
9A4-8	398	0.4	14	14	1	81	0
9F2-7	398	0.8	14	14	1	87	2
2I4-4	401	0.9	10	28	2	38	1
9F5-7	411	0.6	13	16	2	70	3
2I5-4	425	1.4	8	8	1	75	1
6A4-4	425	1	8	8	1	66	0
9E5-1	425	1	8	8	1	108	2
9F4-1	425	1.2	8	8	1	56	3
6A4-3	435	0.57	10	12	2	52	4
9D3-5	443	0.3	15	15	1	67	1
9C4-2	487	0.9	9	9	1	60	1
9E3-12	487	1	9	9	1	62	2
9E2-3	497	0.5	8	29	5	69	1
6B6-3	509	1	8	20	2	495	1
3G1-2	510	0.6	13	22	2	25	1
9F4-7	524	1	11	22	2	60	2
2I4-1	549	1.2	10	10	1	49	2
9B4-6	549	1	10	10	1	43	2
9F3-4	549	1.6	10	20	1	39	3
2H4-3	558	0.4	6	16	3	55	1
2I6-1	566	1	7	16	3	28	1
3G1-1	597	0.6	14	25	2	24	2
6A3-5	597	0.8	9	12	2	71	1
2I4-3	603	1.5	6	13	3	59	2
2H5-3	613	1.5	11	11	1	34	0

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
3H1-1	613	1.2	11	11	1	34	1
9C4-1	613	1.5	11	11	1	28	2
9C6-3	619	1.5	8	17	3	115	1
9D3-6	624	0.6	17	23	2	110	2
9E3-2	669	0.8	7	22	7	136	3
9E2-4	679	1.5	12	12	1	18	2
3G2-1	689	0.6	16	26	2	60	2
9E3-9	755	0.8	15	20	2	67	3
9F2-6	784	0.6	12	33	3	67	3
2H5-6	785	1.5	10	15	2	218	2
9A3-2	887	3	15	15	1	29	3
9E3-6	887	1.7	15	15	1	64	3
9A5-2	947	0.3	18	18	1	32	1
2I6-2	974	2	10	25	2	50	3
9F6-2	985	1.5	8	21	3	213	2
2H4-2	993	1	9	19	3	152	2
9F3-2	1003	1.5	12	28	4	84	3
9D1-4	1038	1.25	11	20	2	53	3
9B6-3	1058	1.2	8	19	2	39	1
2G6-1	1109	2.2	18	18	1	32	4
9D4-1	1144	1.7	8	18	2	47	4
9D3-3	1172	1.85	8	19	2	94	5
2G6-2	1187	3	19	19	1	32	3
2H6-5	1189	1.4	10	26	1	29	5
2H5-5	1206	1.7	9	18	2	40	2
9B5-2	1242	1.5	7	23	2	19	2
9D3-4	1267	1.9	20	20	1	12	5
9D3-2	1310	0.8	12	30	3	123	3
2I5-2	1343	1.9	12	20	3	158	3
9F4-4	1347	1	13	33	4	61	4

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
9E3-10	1349	1.8	21	21	1	76	3
9F3-5	1360	2.2	14	24	1	23	5
2H4-1	1385	1.5	13	22	3	39	3
9B6-2	1386	1	8	23	3	39	3
9A4-4	1397	1.5	14	20	1	39	3
9A3-1	1410	2.5	13	25	2	28	3
2H6-2	1426	2	13	35	2	29	1
9A3-3	1431	2.5	13	29	3	25	5
9A5-3	1468	1	16	45	3	20	5
3H1-3	1496	1.7	14	30	2	66	4
2H6-4	1508	2	16	28	2	16	4
2G6-3	1516	7.5	23	23	1	40	4
2E5-1	1537	1	10	28	4	35	2
9D1-2	1628	1	6	38	3	33	2
2H5-4	1662	2.5	12	24	2	13	5
9B5-5	1667	1.6	13	22	3	20	2
9F5-6	1694	1.2	11	17	4	38	4
9F2-2	1924	3	14	24	2	66	4
9E3-1	2059	1.5	15	21	3	94	4
8D11-1	2067	2	9	33	4	28	3
2I5-1	2076	2.8	11	32	3	70	5
9A3-4	2122	2.5	20	28	2	43	5
2H6-3	2146	4	19	36	2	30	1
9A3-10	2147	1.2	16	29	2	30	3
6A4-2	2195	2.1	17	20	2	44	4
9E2-5	2204	2	17	24	2	67	5
9B4-4	2296	2.5	16	35	4	105	5
9F5-5	2306	1.7	17	26	3	68	5
9A4-6	2383	1.4	13	38	3	34	4
9B4-3	2408	3.1	10	28	4	40	5

ID	LI	Hauteur max	Diagonale	Longueur zone	Nombre de structures	densité	Niveau visualisation
9B5-4	2413	1.8	13	28	3	33	4
3I1-2	2503	1.6	11	43	3	63	3
9B5-6	2537	1.5	15	36	4	17	3
9D5-1	2703	2.2	21	28	3	25	4
6A6-1	2822	2	13	36	3	71	5
9C3-2	2900	3	14	32	4	52	4
2G5-1	3073	7.9	20	26	3	140	5
8E11-3	3313	1.8	11	40	3	25	3
9E3-5	3344	2.5	18	25	3	45	4
9E3-3	3477	2.5	15	27	4	60	5
9A4-1	3501	2	14	38	5	35	5
6A4-1	3526	1.5	18	32	4	45	4
9E4-2	3680	2	16	30	4	51	5
2H5-1	4105	6	25	34	2	16	4
9C6-1	4546	4	14	51	4	15	5
9B5-1	5356	3	16	47	7	35	5
6D3-1	5793	11.1	20	37	6	98	4
2H5-2	6173	4.5	31	52	6	13	5
9E2-2	6744	2	17	67	4	75	5

Contexte :

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un outil topographique devenant de plus en plus important dans le domaine de l'archéologie. Son intérêt est justifié en raison de ses capacités d'arpentage au travers de la canopée et sa rapidité d'exécution pour les grandes surfaces. Il est le plus approprié pour la détection des sites Mayas recouverts par une abondante forêt tropicale et particulièrement difficile d'accès. Grâce au LiDAR, beaucoup de vestiges ont été découverts, mais nombre d'entre eux préalablement connus ne sont pas clairement visibles d'après l'imagerie produite. Par conséquent, les critères de détection de cet outil, sa puissance et les facteurs influant la visibilité des vestiges sont en question.

Ce TFE présente les différentes étapes qui tentent de répondre à ces questions, en énonçant la visualisation des sites préalablement connus, l'identification de nouveaux sites, l'exploration sur le terrain et pour finir avec l'analyse des résultats récoltés. Il rendra compte des capacités extraordinaires et les avantages de son utilisation dans l'archéologie, en particulier dans les environnements difficiles.

Mots clés : LiDAR, Mayas, Détection, Exploration, Canopée, Cartographie, Archéologie, identification, SIG

Abstract :

LiDAR (Light Detection And Ranging) is a topographical tool that has become increasingly more important to the field of archeology. Its recognition is warranted due to its surveying capabilities to cross through the canopy and for its speed of execution for large surfaces. It is most suitable for the detection of Maya sites covered by abundant tropical forest and particularly difficult to access. Thanks to LiDAR, many relics have been discovered, but many of them previously known are not clearly visible with produced imagery. Therefore, the criteria for detection of this tool, its power, and influential factors of the visibility of the remains are in question.

This TFE presents the different steps that try to answer to these questions, as well as discuss the visualization of previously known sites, the identification of new sites and exploration in the field with the analysis of the collected results. It reveals the extraordinary capacities of LiDAR and the benefits of its use within archaeology, especially for challenging environments.

Keywords : LiDAR, Mayas, Detection, Exploration, Canopy, Cartography, Archeology, identification, GIS