



**HAL**  
open science

Mise en place d'un protocole pour découvrir  
l'architecture des anciens sites Maya basé sur les images  
LiDAR : modèles d'utilisation du paysage dans la forêt  
Maya

Juliette Lardilleux

► To cite this version:

Juliette Lardilleux. Mise en place d'un protocole pour découvrir l'architecture des anciens sites Maya basé sur les images LiDAR : modèles d'utilisation du paysage dans la forêt Maya. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01179257

**HAL Id: dumas-01179257**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179257>**

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

**Juliette LARDILLEUX**

---

Mise en place d'un protocole pour découvrir l'architecture des anciens sites  
Maya basé sur les images LiDAR :

Modèles d'utilisation du paysage dans la forêt Maya

**Soutenu le 10 juillet 2014**

---

**JURY**

**PRESIDENT : M. Rani EL MÉOUCHE**

**Enseignant à l'ESTP**

**MEMBRES : M. Laurent POLIDORI**

**Professeur Cnam, Directeur**

**Mme Joëlle DUROY**

**Professeur référent**

**Mme Perrine THEBAULT**

**Membre du jury**

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dr. Anabel Ford pour m'avoir permis de réaliser mon TFE au sein de son laboratoire de recherche MARC.

Je tiens à remercier tout particulièrement Narciso Torres – un Forest Gardeners – pour tout ce qu'il nous a appris dans la jungle, sa passion pour sa forêt Maya mais aussi pour sa gentillesse, sa générosité et sa bonne humeur.

Je tiens également à remercier Peter M. qui nous a aussi accompagné dans la jungle et aidé lors des relevés terrain.

Je remercie mon professeur référent Joëlle DUROY pour m'avoir aidé dans la rédaction de ce mémoire, pour le temps qu'elle m'a accordé et son accompagnement au long de ces derniers mois.

Je remercie également les personnes du laboratoire MARC : Connie, Becca pour leur accueil au sein de l'Université de Santa Barbara.

Enfin, merci à toute ma famille pour m'avoir soutenu tout au long de ce TFE.

## Liste des abréviations

MARC : Meso American Research Center

LiDAR : Light Detection And Ranging

SIG : Système d'Informations Géographiques

MNT : Modèle Numérique de Terrain

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

TFE : Travail de Fin d'Étude

## Glossaire

Master Forest Gardeners : Fermiers Mayas utilisant des méthodes d'agriculture qui encouragent la biodiversité et le développement de la forêt.

Shapefile : Format de fichier contenant toute l'information liée à la géométrie des objets décrits (points, lignes, polygones).

BaseCamp : Application développée par GARMIN proposant une interface simple permettant d'afficher des cartes Garmin et de gérer des données géographiques.

Ball Court : Large structure utilisée dans la Més-Amérique pour jouer à un jeu de balle.

Formes culturelles : Désignent tous les éléments d'architecture construits et/ou utilisés par les Mayas (Maisons, places, dépressions ou aguada, carrières).

Monts : Vestiges des maisons Mayas qui ressemblent aujourd'hui à des monticules de terre et de pierres. Ils sont le résultat de l'effondrement des maisons.

Chultun : Chambre de stockage souterraine construite par les Mayas.

Formes naturelles : Désignent les éléments présents à l'état naturel dans la jungle tels que les arbres tombés, pentes naturelles, drainages...

# Table des matières

Remerciements

Abréviations

Glossaire

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....   | 7  |
| I. Contexte .....  | 10 |
| I.1 Architecture et LiDAR dans le cas Maya .....   | 10 |
| I.2 Travaux précédents .....   | 11 |
| I.2.1 Différentes méthodes de relevés .....  | 11 |
| I.2.1.1 Méthode de cheminement .....   | 11 |
| I.2.1.2 Goniographe .....  | 13 |
| I.2.2 Année 2013.....  | 13 |
| I.2.2.1 Image LiDAR et visualisations.....   | 13 |
| I.2.2.2 Terrain 2013 .....   | 14 |
| I.2.2.3 Mission 2014 .....   | 15 |
| II. Mise en place du protocole .....   | 16 |
| II.1 La plateforme SIG pour le travail au bureau et sur le terrain .....                       | 16 |
| II.1.1 Intégration de l'image LiDAR au SIG et couches existantes.....                          | 16 |
| II.1.2 Problème de géoréférencement des données anciennes et des dessins .....                 | 17 |
| II.1.3 Problème de collection des points et métadonnées .....                                  | 18 |
| II.1.3.1 Collection des données .....  | 18 |
| II.1.3.2 Métadonnées .....   | 19 |
| II.2 Mise en place de critères formels .....   | 19 |
| II.2.1 Grilles .....   | 19 |
| II.2.2 Numérotation des sites.....   | 20 |
| II.2.3 Système de dessins .....  | 21 |
| II.2.3.1 Type de dessins .....   | 21 |
| II.2.3.2 Symbologie.....   | 23 |
| II.3 Méthode .....   | 25 |
| II.3.1 Problèmes rencontrés en 2013.....   | 25 |
| II.3.2 Du SIG au GPS .....   | 26 |
| II.3.2.1 Présentation du GPS et dossiers d'enregistrement .....                                | 26 |
| II.3.2.2 Transfert des données présentes dans le SIG vers le GPS (Figure 17) .....             | 27 |
| II.3.2.2.1 Sélection des points d'exploration sur ArcGIS : création du fichier DBF requis..... | 27 |
| II.3.2.2.2 Passage par DNR Garmin : Création du fichier GPX.....                               | 27 |
| II.3.2.2.3 Transfert dans le GPS .....   | 27 |
| II.3.3 Utilisation du GPS sur le terrain et positionnement des points (Figure 19) .....        | 28 |
| II.3.3.1 Environnement, limites et précision .....   | 28 |
| II.3.3.2 Feuilles de terrain utilisées et cartes .....   | 29 |
| II.3.3.3 Navigation .....  | 30 |
| II.3.3.4 Enregistrement .....  | 30 |
| II.3.3.4.1 Dans le GPS.....  | 30 |
| II.3.3.4.2 Fichiers de sortie du GPS .....   | 31 |
| II.3.3.5 Organisation des équipes sur le terrain .....   | 32 |
| II.3.4 Déchargement des données : GPS au SIG (Figure 20) .....                                 | 32 |
| II.3.4.1 Déchargement des données : intégration au SIG .....                                   | 32 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| II.3.4.1.1 | Sauvegarde et conversion des fichiers bruts obtenus la journée .....               | 32 |
| II.3.4.1.2 | Géoréférencement des fichiers shapefile et intégration dans le SIG .....           | 33 |
| II.3.5     | Concaténation et gestion des données des différents utilisateurs dans le SIG ..... | 34 |
| II.3.5.1   | Traitement des points .....  | 34 |
| II.3.5.2   | Traitement des dessins .....   | 35 |
| II.3.6     | Application des méthodes .....   | 35 |
| III.       | Analyse : Comparaison de la carte de 2001 et de 2014 .....                         | 39 |
| III.1      | Précision du dessin .....  | 39 |
| III.2      | Influence de la précision sur la densité .....                                     | 41 |
| III.2.1    | Calcul classique de la densité des structures .....                                | 41 |
| III.2.2    | Nouveau calcul .....   | 41 |
| III.2.3    | Facteurs influant sur la densité des monts .....                                   | 41 |
| III.2.3.1  | Végétation .....   | 42 |
| III.2.3.2  | Topographie .....  | 44 |
| .....      | .....  | 44 |
| III.3      | Intérêt de la nouvelle méthode .....   | 45 |
| Conclusion | .....  | 47 |

Bibliographie

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

## Introduction

Les tropiques sont une partie du monde qui n'est pas facile à maîtriser quand il s'agit du développement d'une civilisation. En particulier lorsqu'il s'agit d'une zone où la jungle tropicale constitue l'environnement principal.

Certains peuvent penser que cela constitue un environnement hostile, cependant une civilisation aujourd'hui disparue, s'étendait dans les plaines de la Més-Amérique (Mexique, Guatemala, Belize, El Salvador et le Honduras) : les Mayas.

Malgré un environnement « hostile », les Mayas savaient comment utiliser leur forêt, comment la contrôler pour qu'elle leur soit utile et bénéfique : pour s'alimenter, les Més-Américains utilisaient ce qu'ils trouvaient dans leur environnement, ils utilisaient leurs ressources naturelles locales et avaient des stratégies agricoles qui intégraient les plantes locales natives. Pour subvenir à leurs besoins et à leur population grandissante, ils cultivaient les plantes de la forêt. Des recherches actuelles ont montré que 90 % des arbres de la forêt sont utiles aux humains. (Campbell et al 2006, Ford 2008).

Les Mayas ont réussi à créer de grandes villes au milieu de la jungle en utilisant habilement ce qu'ils avaient à leur disposition : carrières naturelles pour construire leurs temples, du bois pour leurs maisons, de la chaume pour leurs toits, stockage de l'eau dans les sols argileux... Ils travaillaient donc leur forêt tropicale pour pouvoir y vivre tout en la conservant et la protégeant.

Cependant, la population déclina, ils cessèrent de construire des temples. Les hypothèses quant au déclin de cette civilisation sont multiples et variées : surpopulation, famines, épidémies, désordre civil ... N'ayant aucune réelle preuve, chacun essaie d'imaginer au mieux ce qui a pu arriver. Pourtant, les villes Mayas trouvées par les Espagnols au temps des conquêtes étaient prospères.

Malgré ce déclin de la population Maya, il ne faut pas parler d'extinction car aujourd'hui ils sont toujours présents dans la zone d'Amérique Centrale.

Grâce au projet « Exploring Solutions Past » mené par le laboratoire MARC (MesoAmerican Research Center), son directeur Anabel Ford essaie de comprendre comment les Mayas utilisaient leur paysage et leurs ressources à travers les « Forest Gardeners » de la forêt Maya. Ces derniers peuvent nous enseigner un modèle d'agriculture qui leur a été transmis par leurs ancêtres dans lequel les gens et la nature peuvent se développer en harmonie par des méthodes de cultures traditionnelles, de protection et d'utilisation de la flore et de la faune locale. La compréhension, le développement et le partage de ces méthodes permettraient d'aider les populations futures à sauvegarder et utiliser leurs forêts qui sont si précieuses et pleines de ressources et pourtant menacées par la déforestation et l'agriculture intensive.

Le projet est mené sur le site d'EL Pilar (Figure 1) qui se trouve à cheval sur la frontière entre le Belize et le Guatemala et qui s'étend sur une vingtaine de kilomètres carrés.

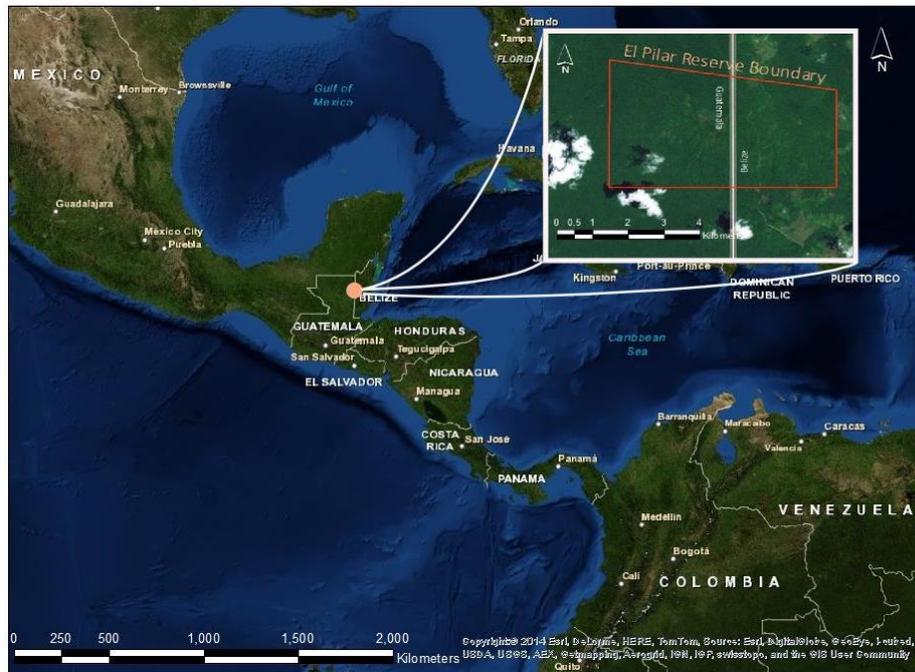


Figure 1 : Carte de situation de la réserve d'El Pilar

Source : ArcGIS

El Pilar est une ancienne cité Maya qui se distingue des autres sites archéologiques Mayas par une volonté de vouloir conserver les sites architecturaux présents dans leur état naturel. Cela passe par le fait de ne pas laisser à découvert la majorité des architectures, de garder la canopée intacte, de ne pas défricher la jungle mais de la considérer comme un outil de protection du site : elle permet de lutter contre l'érosion des structures, leur dégradation, le noircissement des pierres...

Certains grands sites comme Tikal (Figure 2) voient apparaître de nombreuses dégradations de leurs temples. La rénovation des façades, protection des bâtiments ainsi que d'autres mesures ont été mises en place pour tenter de lutter contre ces dégradations. La seule protection efficace est l'ombre des arbres natifs.



Figure 2 : Carte de situation de Tikal

Source : ArcGIS

Le programme mené à El Pilar cherche à promouvoir l'héritage culturel, la conservation de la nature et le développement communautaire en bénéficiant de l'aide des villageois locaux. La compréhension de comment la population Maya arrivait à se développer dans un environnement tel que la forêt Maya est donc le but de ce projet. Mais pour comprendre vraiment les formes culturelles et naturelles de la Réserve Archéologique d'El Pilar, il est indispensable d'identifier et de cartographier les vestiges existants pour ainsi les protéger (ainsi que la flore et la faune).

Le but de ce mémoire est donc de définir et d'appliquer un protocole terrain pour la cartographie des vestiges mayas. Pour cela, nous utiliserons l'image LiDAR (Light Detection and Ranging) pour cibler les endroits des relevés. Cela signifie des relevés terrains des différentes architectures que l'on peut trouver sur un site archéologique Maya : exploration et validation de l'imagerie LiDAR (TFE Gabriel Mordant, 2014).

Il s'agit donc dans un premier temps d'établir et de tester une stratégie pour transférer les points d'exploration identifiés sur le SIG vers le GPS, de collecter les données sur le terrain avec plusieurs unités GPS, d'intégrer ces données dans le SIG de la forêt Maya et de développer une manière de dessiner pour réaliser les cartes. Ce protocole est indispensable pour pouvoir aboutir à des relevés efficaces, ainsi qu'à une carte correcte de ce qu'il convient de protéger sur le site d'El Pilar. Les résultats obtenus seront comparés avec les méthodes de relevés archéologiques traditionnels pour prouver la puissance du LiDAR comme outil essentiel pour des relevés de terrain précis en archéologie.

L'objectif de ce stage est donc de mettre en place un protocole qui permettra de réaliser la carte de la réserve archéologique d'El Pilar de manière efficace. Ainsi, si le Dr. Anabel Ford décide qu'il faut relever la réserve entière pour les besoins du projet, ce sera possible en un temps minimum et en utilisant les outils dont dispose le laboratoire (image LiDAR, GPS, SIG).

On pourra donc dans un premier temps s'intéresser au contexte dans lequel s'inscrit ce projet : projets précédents et techniques utilisées. Ensuite, on pourra voir la méthode mise en place afin de développer un nouveau protocole pour effectuer les relevés terrain sur la réserve d'El Pilar. Enfin, on verra ce que ce protocole apporte par rapport aux méthodes de relevés traditionnels

## I. Contexte

### I.1 Architecture et LiDAR dans le cas Maya

Avec les images LiDAR, il est facile de trouver les vestiges de grande taille. Les temples importants et le centre des cités Maya se détectent très facilement sur l'image LiDAR grâce à leurs hauteurs importantes (Exemple : El Pilar<sup>1</sup>). La plupart de ces sites repérés sur les images LiDAR en 2013 étaient déjà connus. Cependant un site en particulier, appelé Citadelle, a été découvert grâce à l'image<sup>2</sup> (MARC, 2013). D'autres éléments peu visibles sur le terrain et visibles sur l'image LiDAR ont permis de comprendre le site. En effet, les deux sites majeurs d'El Pilar ont tous les deux une chaussée qui renseigne sur le chemin qu'empruntaient les Mayas pour se rendre sur le site. Cependant, les deux chaussées ne se situent pas en face l'une de l'autre et la connexion entre les deux n'avait jamais été trouvée. L'image LiDAR a révélé nettement comment ces deux chaussées étaient reliées entre elles<sup>3</sup> : via la « Sunken plaza » avec un « Ball-Court ».

Toutefois, lorsqu'il s'agit de trouver les éléments d'architectures plus petits comme les maisons, cela devient plus compliqué. Pourtant ce sont eux qui composent la ville autour du centre de la cité et qui peuvent apporter des informations pour comprendre comment les villes fonctionnaient, comment le terrain était utilisé, combien de personnes habitaient là...

Où sont situés les vestiges ? Comment sont-ils organisés entre eux ? Comment sont-ils positionnés ? Sont-ils situés près d'une carrière ou près d'une source d'eau ? ... Les réponses à ces questions permettent de comprendre comment les Mayas vivaient, comment ils fonctionnaient, se nourrissaient, construisaient leurs maisons ... Il y a aussi une autre facette importante pour la cartographie des vestiges : ils représentent des ressources qui sont protégées et gérées par le gouvernement du Belize pour la partie Est et par le Guatemala pour la partie Ouest. Au mieux ces ressources culturelles et naturelles du site seront connues, au mieux elles pourront être gérées et protégées.

C'est donc la raison pour laquelle il est nécessaire de réaliser une carte de tous les composants du site : maisons, carrières, sources d'eau, chaussées ... situés dans la réserve d'El Pilar. Chaque élément a son importance et apportera une source d'information précieuse. La carte va donc constituer un outil d'analyse à la compréhension du site et de son fonctionnement.

---

<sup>1</sup> Annexe 1 : Image Lidar du site d'El Pilar

<sup>2</sup> Annexe 2 : Image Lidar de la Citadelle

<sup>3</sup> Annexe 3 : Détection d'éléments de jointure entre les deux sites majeurs d'El Pilar

## I.2 Travaux précédents

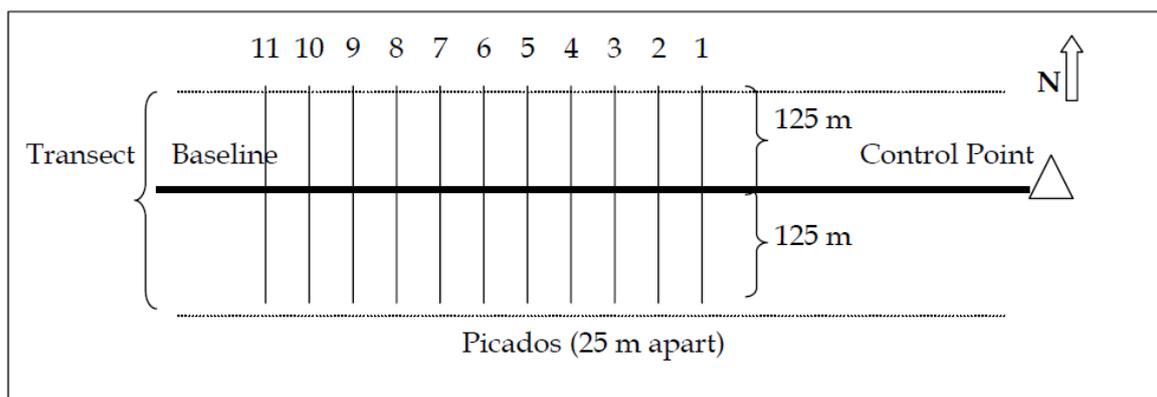
### I.2.1 Différentes méthodes de relevés

Plusieurs types de méthodes peuvent être utilisées pour relever des éléments architecturaux. Malgré les différentes possibilités, ces méthodes se décomposent en quatre étapes identiques :

- Prise de décision sur la méthode, l'équipement, les données à collecter ...
- Acquisition des données : prise des mesures ainsi que leur enregistrement
- Traitement des données
- Cartographie et représentation des données.

#### I.2.1.1 Méthode de cheminement

Les premiers relevés des sites Maya à une grande échelle (entre 10 et 30 km) sont réalisés à l'aide d'une méthode appelée « pace and compass » : méthode de levé des sites par cheminement à l'aide d'une boussole (Bullard, 1960) (Figure 3).



**Figure 3 : Schéma d'un relevé par cheminement**

Source : Rapport de terrain 2001

A partir de points de contrôles établis au niveau du site d'El Pilar, des chemins de base sont installés à l'aide d'un théodolite modélisant une ligne droite (brèche réalisée au milieu de la jungle) sur laquelle sont fixés des repères (picados) tous les 25 m. À partir de chacun de ces points de base, des transects perpendiculaires étaient parcourus pour chercher les formes culturelles. Les distances horizontales ont été mesurées à l'aide d'un chaînage ou d'un transit. La distance de 25 m a été choisie car au milieu de la jungle on voit en général jusqu'à 12-13 m. Ainsi entre 2 transects, on peut tout voir.

Ce type de cheminement à la boussole est particulièrement intéressant pour obtenir un plan d'ensemble du terrain. Deux types de précision entrent en jeu : la précision des points de données (Datum) ainsi que la précision de relevés des monts.

Les points de données (Datum) sont les points qui géoréférencent un site et auquel sera attribué un numéro explicite permettant de savoir où se trouve le site (voir II.2.2).

Les points de données sont établis à partir de points de contrôles installés dans les années 1990 : des points de base sont installés dans un premier temps le long de la ligne de base et c'est alors à partir de ces points que les points de données étaient définis. Ces points de données n'étaient pas associés à des formes culturelles qui constituaient un ensemble mais ils servaient de base pour les relevés d'une certaine zone.

La précision pour les relevés de l'ensemble de ces points est estimée à une dizaine de centimètres (Figure 4).

*Large Scale Control {Point Propagation Survey Methods*

|                | Mapped Areas  | Environmental Features  | Specific data   |
|----------------|---|---|---|
| Georeferencing | 3 inter-visible control points                            | Control Points  | UTM 2*2 grid  |
| Method         | Carrier mode processing: 45min<br>Differential correction | GPS with carrier mode processing<br>Or<br>Terrestrial transit survey with least square adjustment | GPS or terrestrial transit set up from control points |
| Accuracy       | < 10cm  | < 10cm  | 10cm  |
| Survey         | Total station   | Total station   | Laptop  |
| Drawing        | GIS / CAD   | CAD   | GIS   |
| Accuracy       | 10cm  | 10cm  | The unit  |

**Figure 4 : Tableau récapitulatif des méthodes de relevés utilisées en 2001**

Source : Anne Girardin, 1999

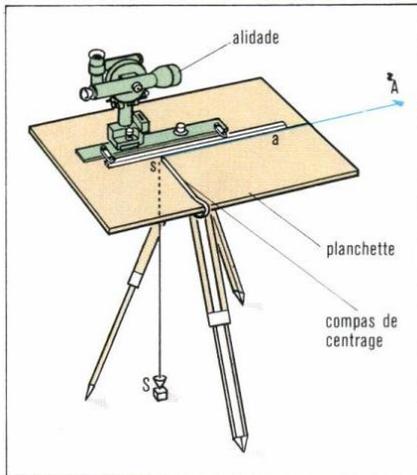
On peut estimer la précision de relevé des monts à environ 5-10 m. En effet, les dessins réalisés sont toujours plus ou moins approximatifs. Quand un site était trouvé, il était dessiné et reporté sur papier<sup>4</sup> avec les dimensions et hauteurs des différents éléments (monts, places, carrières, chultun) constituant l'ensemble. Cette méthode était donc assez longue puisque les arpenteurs n'avaient aucun repère pour se situer lorsqu'ils se trouvaient sur le terrain. Or l'expérience montre qu'il est difficile de se repérer sur le terrain et que l'on perd très vite tous ses repères lorsque l'on se trouve au milieu de la jungle.

C'est de cette manière qu'un étudiant d'Anabel Ford (Johan Normark, 2001) a relevé en 2001 sur le site d'El Pilar l'ensemble des éléments d'architecture. Ses lignes de base ont été basées à partir de points de contrôle fixés sur le site d'El Pilar. Par la suite, ses croquis ont été numérisés et importés sur le SIG de la forêt Maya du laboratoire MARC.

<sup>4</sup> Annexe 4: Fiches de relevés type lors d'un cheminement

### I.2.1.2 Goniographe

Le goniographe (Figure 5) est un appareil qui permet de représenter graphiquement des angles. Pour dessiner, on utilise comme plan de report une planchette sur laquelle on va fixer le papier. L'horizontalité de cette dernière va être contrôlée au moyen d'une nivelle sphérique. On dessine directement sur cette planchette. Pour matérialiser la trace horizontale, on se sert d'une alidade : organe de visée.



**Figure 5 : Goniographe**

Source : Encyclopédie Larousse  
pour cartographier le site de Tikal (Figure 2). Pour couvrir l'ensemble de la zone (16km<sup>2</sup>), les levés ont duré quatre ans (Carr et Hazard, 1961) : de 1957 à 1960.

Le goniographe est l'ensemble constitué par la planchette et l'alidade.

Avec cet appareil, tout le travail est directement effectué sur le terrain : le dessin est réalisé en même temps que le levé des points. Il n'est pas nécessaire d'avoir un temps de bureau après le terrain. Cependant, le temps passé sur le terrain sera plus long et de plus on doit se soumettre aux caprices de la nature.

Ce genre de relevés possède un certain nombre d'avantages. Il permet de cartographier la zone tout en l'observant. Cette méthode a par exemple été utilisée

→ Ces deux types de méthodes représentent le moyen de relevés traditionnels qui étaient utilisés pour relever les sites archéologiques dans la zone d'occupation Maya en Méso-Amérique.

C'est donc la méthode de cheminement qui a été utilisée sur le site d'El Pilar en 2001. Aucun relevé terrain n'a été effectué jusqu'en 2013. Les recherches sur le site se sont concentrées sur les fouilles ainsi que sur le développement du parc binational et de la protection et de la conservation de la forêt Maya.

En 2013, la donation d'une image LiDAR au laboratoire par MayaNiquel a relancé le projet de cartographie du site.

## I.2.2 Année 2013

### I.2.2.1 Image LiDAR et visualisations

Le site d'El Pilar se trouve au milieu d'une jungle très dense. Pour pouvoir étudier le site de manière aérienne, le laboratoire disposait seulement d'images aériennes

LANDSAT. Cependant le couvert forestier très dense de cette zone limite l'utilisation de ces photos.

En mai 2012, le laboratoire MARC s'est doté d'une image LiDAR (MayaNiquel) couvrant la réserve entière d'EL Pilar. En effet, cette technologie est particulièrement adaptée aux sites situés sous une forêt dense. Les images obtenues permettent de révéler de nombreuses informations jusque-là ignorées et d'aider grandement à la recherche de nouvelles formes culturelles.

La technologie du LiDAR fournit un nuage de points qui doit être traité, analysé et visualisé à l'aide d'un SIG. En effet, l'aéronef survolant la zone, va lancer des impulsions de laser qui vont se réfléchir sur chaque objet qu'il va rencontrer : feuilles de la canopée, branches, papillons, ... Seulement 2.3 % (Gabriel Mordant, 2014) des rayons se réfléchissent sur le sol. L'objectif est d'obtenir une visualisation du sol réel.

A l'aide d'une classification du nuage de points, une visualisation appelée Bonemap a été réalisée par T. Pingle<sup>5</sup> (Pingle, 2013). C'est une image raster qui représente en chaque pixel la pente. Hugo Bihl (2013) a réalisé une dizaine d'autres visualisations et il en a été conclu – après des tests effectués sur le terrain – que la Bonemap est la meilleure visualisation que l'on peut obtenir. Elle représente de manière la plus fidèle la topographie. En effet, un grand nombre de visualisations testées étaient basées sur le modèle *BareEarth*. Or, lors de la classification du nuage de points en différentes couches, les bâtiments qui sont hauts voient leurs sommets intégrés à la végétation haute. Ce n'est donc pas un traitement adapté à un nuage de points contenant une végétation dense car le raster de sortie fournit les élévations du sol mais avec des informations manquantes comme le haut des bâtiments et pyramides.

Le LiDAR est utilisé par de nombreux archéologues qui voient cela comme une solution « magique » pour trouver, explorer et découvrir de nouvelles formes culturelles (Chase and Chase, 2012). Ces derniers pensent que l'image LiDAR révèle tout ce qui se trouve sous la canopée. De plus, ils utilisent en majorité le modèle de la *BareEarth* qui n'est pas forcément le plus adapté à ce type d'études. L'archéologue et anthropologue Professeur Rosemary Joyce (2012) décrit bien la situation: « That may be good science — but it is bad archaeology » (*Good science, big hype, bad archaeology*, 2012). Elle critique ce qui a été fait au Honduras car il semblerait que les archéologues cartographient les sites en utilisant seulement les images LiDAR sans vérité terrain. Le LiDAR est un outil très utile pour les forêts Méso-Américaines et autres zones où les relevés terrain sont compliqués en raison de la végétation dense. Les informations fournies par cette nouvelle image, cependant, ne sont pas une solution miracle et ne révèlent pas toutes les formes comme on peut les voir sur la réserve Archéologique d'El Pilar.

### I.2.2.2 Terrain 2013

Les sites de 2001 ont été géoréférencés en utilisant les points de contrôle existants sur le site d'El Pilar. Après l'acquisition de l'image LiDAR, les formes archéologiques identifiées en 2001 ont été réexaminées dans la plateforme SIG.

---

<sup>5</sup> Annexe 5 : Raster de visualisation - appelé Bonemap – issu du nuage de points LiDAR sur la réserve d'El Pilar

C'est avec une bonne surprise que les sites numérisés se sont révélés assez bien placés par rapport à l'image LiDAR. Cependant, un nombre important d'aires relevées montrent des formes culturelles qui semblent mal placés, décalés... Cela est peut-être dû au résultat de relevés par transects et non pas en examinant le paysage.

Une partie de la mission terrain de 2013 a donc consisté à retourner valider tous les sites cartographiés en 2001 et définir s'ils étaient acceptés ou rejetés. La phase de validation des points sur le terrain a permis par la suite de valider quelle visualisations de l'image LiDAR était la plus adaptée.

### I.2.2.3 Mission 2014

Lors de la mission terrain 2013, la collection des données n'a pas été une réussite du point de vue de l'organisation et du traitement.

Une des missions de 2014 consiste à revalider et cartographier de nouveau les formes culturelles qui ont été acceptés en 2013. Pour cela on va devoir mettre en place des critères clairs ainsi que des méthodes à utiliser. L'objectif est de créer un protocole de collection de données systématique afin d'établir une base de données à la fois correcte et efficace. Pour évaluer ce nouveau protocole, on pourra s'intéresser à ce qu'il apporte par rapport aux anciennes méthodes de relevés et en quoi l'utilisation de l'image LiDAR apporte un plus et améliore les stratégies de relevés archéologiques.

## II. Mise en place du protocole

### II.1 La plateforme SIG pour le travail au bureau et sur le terrain

#### II.1.1 Intégration de l'image LiDAR au SIG et couches existantes

L'image LiDAR a été insérée dans la plateforme SIG. Le laboratoire MARC possède depuis 1998 une plateforme SIG appelée : SIG de la forêt Maya. Le logiciel utilisé est ArcGIS 10.2.

Le SIG possède de nombreuses couches déjà géoreferencées qui constituent la base de données à différents niveaux : régional, local et du site. Toutes les données que nous utilisons sont au niveau du site. On a sélectionné les couches nécessaires, intéressantes et utiles au travail demandé. Tous les noms des couches mentionnés sont les noms « officiels » utilisés au sein du laboratoire MARC.

Les différentes couches intégrées au SIG lors de notre arrivée sont les suivantes :

- Architecture Johan (2001): Tous les sites relevés avec la méthode de relevé traditionnel « pace and compass » en 2001, numérisés et intégrés au SIG. Cette base de données de 2001 représente toutes les formes architecturales dans la forêt Maya autour du site d'El Pilar.
- WEP 477 (2013): La table finale d'Hugo Bihr (2013) comportant tous les points visités pendant la saison de terrain 2013 ainsi que des informations sur chacun de ces points (coordonnées GPS, végétation, observations par rapport aux rasters de visualisation, densité des points au sol (25 m<sup>2</sup>)...) et notamment le fait que le point soit accepté ou rejeté.
- Architecture Paulino (2013): Mise à jour des formes culturelles de 2001 qui sont liées aux points de données d'Hugo Bihr (2013).

Après la saison de terrain 2013, Paulino Morales (archéologue Guatémaltèque) a modifié les dessins de Johan Normark (2001) en se basant sur les points acceptés ou rejetés d'Hugo Bihr (2013): suppression des dessins au niveau des points rejetés, décalage des dessins par rapport à ce que l'on voit sur l'image LiDAR (Figure 6).

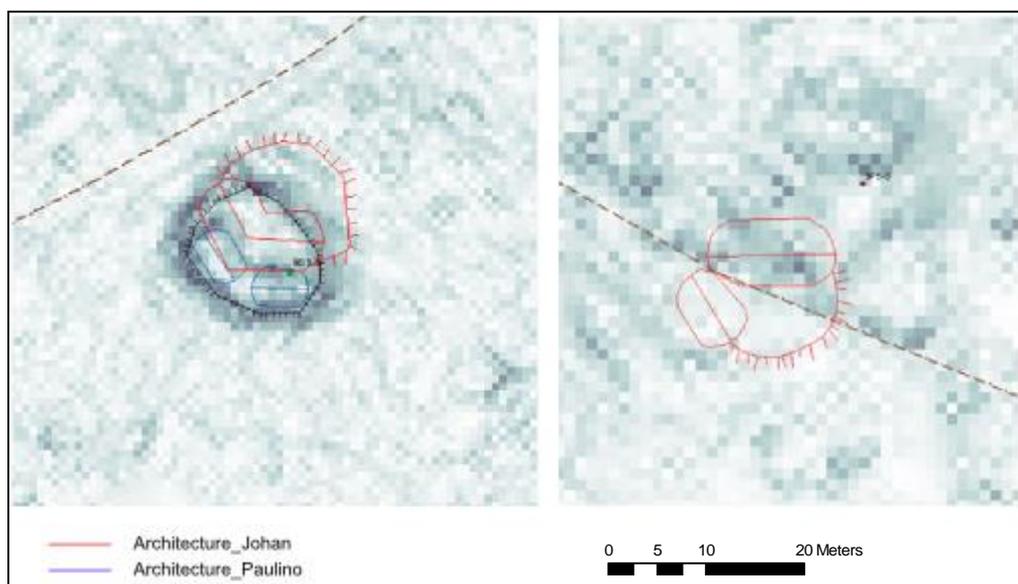


Figure 6 : Image de gauche : Ensemble de 2 monts et place décalés grâce à l'image LiDAR  
Image de droite : Point rejeté en 2013 donc architecture supprimée

Sur l'image de gauche, le point a été validé sur le terrain en 2013 donc Paulino Morales a décidé de décaler le dessin au niveau des formes que montre l'image LiDAR. Sur l'image de droite, le point a été rejeté et donc le dessin a été supprimé.

- GPS tracks :

Fichier shapefile qui compile toutes les routes, chemins et autres empruntées pendant la saison 2013. Ces « tracks » sont automatiquement enregistrées par le GPS.

- Contours : 0.5 m, 1 m, 5 m et 10 m

Lignes de niveau créées à partir du MNT sur ArcGIS.

- Grilles et quadrants :

9 grilles, chacune divisées en quadrants (250 m x 200 m) pour pouvoir se repérer plus facilement sur la carte et sur le site.

- Bonemap : La carte de base qui nous sert de fond réalisée par Thomas Pingle (Pingle, 2013).

- MNT raster : Le MNT qui permet de représenter en couleur les différentes élévations du terrain (Pingle, 2013).

## II.1.2 Problème de géoréférencement des données anciennes et des dessins

L'intégration de l'image LiDAR au sein du SIG de la forêt Maya a permis de se rendre compte que certaines données n'étaient pas correctement géoréférencées même si en général, l'intégration des données s'est révélée plutôt concluante.

Cependant, en ce qui concerne les données mal géoréférencées et un peu décalées, peut-on réellement faire confiance à l'image LiDAR ? Est-ce que ce que l'on voit correspond réellement à ce que l'on pense ?

C'est pourquoi cette année il a été nécessaire de procéder à une validation terrain

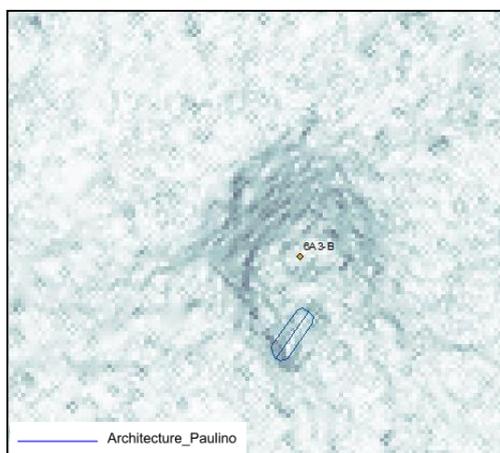


Figure 7 : Exemple de point U

et de retourner cartographier certains sites dont la configuration paraît douteuse. À l'issue de la saison 2013, l'ensemble des points se distinguaient sur la carte par le fait qu'ils soient acceptés (A) ou rejetés (R). On a donc ajouté une troisième catégorie : Unknown (U) qui constituent les points à aller vérifier sur le terrain. Ce sont des points qui présentent des incohérences par rapport à l'image LiDAR : par exemple, on a la présence d'un mont mais grâce à l'image on suppose qu'il y en a un autre ainsi qu'une place (Figure 7). C'est donc un endroit qu'il faudra aller vérifier et re-cartographier sur le terrain car seule

la vérification pourra résoudre le problème.

Il nous a ensuite fallu traiter les données 2013 car cela n'a pas été fait correctement : le fichier WEP\_477 s'est révélé incomplet alors que cela devait être le fichier résultat de la saison 2013 : il ne devait rester que des points d'intérêt.

Ces points se différençaient par différents attributs qui avaient été déterminés et plus particulièrement par le fait que les points soient acceptés ou rejetés (après visite sur le terrain).

Cependant, on a remarqué que ce n'était pas tout à fait le cas :

- Points sans attribut ou certaines données manquantes,
- Points doubles superposés...

Le travail de départ a donc été de mettre à jour cette table et de corriger les incohérences que l'on pouvait rencontrer. Après ce travail, cette table WEP\_477 (qui contenait 477 points) ne contenait plus que 384 points.

### II.1.3 Problème de collection des points et métadonnées

#### II.1.3.1 Collection des données

Il est ressorti de la saison de terrain 2013 que la façon de récolter les données, de les décharger et de les intégrer au SIG n'était pas concluante.

Les feuilles de terrain n'étaient pas adaptées au terrain : pas assez de place pour écrire tout ce qui se référait à un site, données à compléter incomplètes, et pas d'espace pour réaliser un schéma. Une seule feuille de terrain était utilisée pour une journée entière<sup>6</sup>. Par exemple, on a trouvé des fichiers Excel et des tables avec des informations manquantes (attributs). Le fait de ne pas avoir de feuilles de terrain claires sur lesquels on pourrait retrouver les données récoltées sur le terrain est un point faible de la saison terrain de 2013.

C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place un protocole clair, que chaque personne respecte et que cela crée des automatismes.

Avec l'aide du Dr. Anabel Ford, j'ai donc décidé de créer 3 différents types de feuilles terrains (Annexes 10, 11, 12) pour pouvoir avoir de bons « registres », collecter toutes les données de manière correcte et complète. Ainsi lorsque l'on rentre du terrain, le traitement des données est d'autant plus facilité. De plus, si les données terrains sont collectées correctement et de manière claire, cela permet à une personne n'étant pas allée sur le terrain de traiter les données ou même de le faire plus tard. De telles feuilles de terrain permettront de retrouver toutes les informations nécessaires.

Ces notes de terrain sont un élément indispensable et très important des relevés terrain : elles sont le seul enregistrement permanent de ce qui a été fait sur le terrain et ce sont elles qui justifient tout ce qui a été fait sur le terrain. Plusieurs conditions doivent être réunies pour avoir des notes de terrains correctes : elles doivent être précises, intègres (rien ne doit être oublié) et claires.

---

<sup>6</sup> Annexe 6 : Exemple de feuille de terrain utilisée en 2013

Cependant, il n'est pas toujours évident de prévoir en avance ce dont on va avoir besoin lorsque l'on ne sait pas du tout les choses vont se dérouler sur le terrain.

En même temps ça permet de se plonger vraiment dans le projet et de connaître d'autant plus le sujet avant d'arriver sur le terrain, cela fait une bonne préparation et il sera toujours temps d'adapter ce qui a été préparé en fonction de la réalité du terrain.

### II.1.3.2 Métadonnées

Un autre problème important est apparu après la saison de terrain 2013 : l'absence de métadonnées pour l'ensemble des fichiers. En effet, Hugo Bihl a laissé une quantité importante de données : fichiers Excel, shapefiles, cartes, documents et autres informations sans aucun moyen de comprendre leur signification et avec des noms qui étaient peut être clairs pour lui mais incompréhensibles pour d'autres. Cela a posé problème pour l'utilisation de ces données et ralenti le travail en 2014 qui pouvait être effectué à la suite de sa collecte de données.

C'est donc par une phase de compréhension, de traitement et de correction des données de 2013 que nous avons commencé notre TFE.

Le laboratoire MARC reçoit de nombreux stagiaires d'année en année. Chaque stagiaire qui travaille sur le SIG de la forêt Maya prend en charge un aspect du projet SIG. Si les règles ne sont pas établies, chaque personne qui va reprendre le projet perdra du temps à comprendre, corriger les données existantes. Chaque personne travaillant sur le SIG doit donc laisser des métadonnées basiques qui décrivent les attributs, comment ils ont été obtenus. De cette manière, le prochain chercheur pourra reprendre le travail là où il a été laissé et sera en mesure de le comprendre et de repartir de ce point-là.

C'est d'ailleurs pour cela que depuis le départ d'Hugo Bihl et la masse de données qu'il a laissé derrière lui que les métadonnées sont devenues un point auquel il faut vraiment porter une grande attention. Toutes les informations, documents de travail ArcGIS, ... doivent être laissés de manière claire et avec assez d'informations qui les décrivent. Il faut aussi laisser des « modes d'emploi » et des documents qui expliquent de qui a été fait clairement (méthodes utilisées, règles d'usages) pour que ce qui ait été fait ait juste à être réutilisé.

## II.2 Mise en place de critères formels

### II.2.1 Grilles

Pour pouvoir se repérer plus facilement et naviguer vers les points d'exploration ciblés sur la réserve d'El Pilar, Paulino Morales a mis en place 9 grilles de tailles variables (Figure 8). La grille 9 a été la première mise en place en 2013 car elle était centrée sur la zone d'étude de la mission terrain. Cependant, en 2014, il a été décidé d'ajouter d'autres grilles afin de couvrir l'ensemble de la réserve d'El Pilar. Huit autres grilles de tailles variables ont donc été ajoutées autour de la grille 9. Chaque grille est subdivisée en un certain nombre de lignes et de colonnes définies par des index (lettres en abscisses et chiffres en ordonnées) : exemple avec la grille 9.

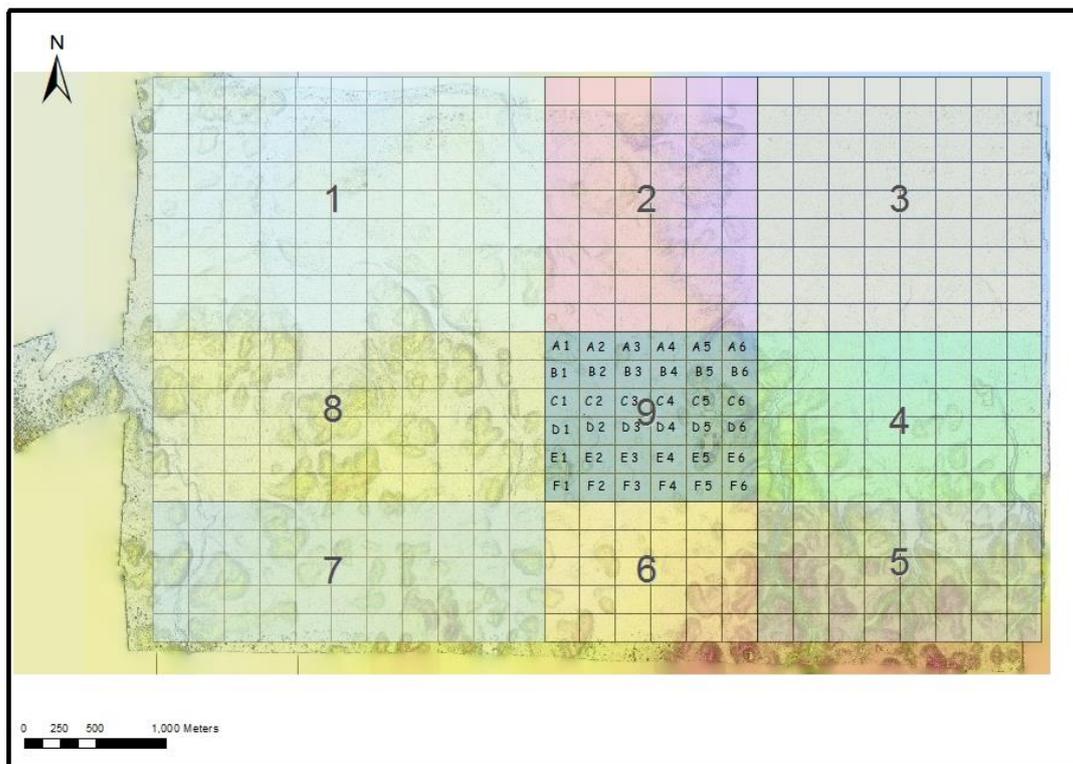


Figure 8 : Grilles mises en place sur la réserve d'El Pilar

La grille 9 est la grille principale de notre étude : elle est centrée sur le site d'El Pilar. Chaque subdivision représente une aire rectangulaire de 250 m sur 200 m. Ces dimensions permettent d'imprimer un quadrant à l'échelle 1:1000 sur un papier au format Letter.

## II.2.2 Numérotation des sites

Les points utilisés des missions précédentes ainsi que les nouveaux créés en 2013 avaient des noms totalement différents et non adaptés car ils ne suivaient aucune règle particulière et chaque mission terrain attribuait ses propres numéros.

Lors de la mission de relevés de 2001, des numéros avaient été attribués aux différents points : E10-1N, E10-2S, A2-16N, F2-6S... Par exemple : A2-18N signifie que le point de contrôle de départ était A2, à partir de ce point, le point se trouvait au nord du 18<sup>ème</sup> « picado ». En 2013, ils réutilisaient ces numéros et lors de l'enregistrement des points dans le GPS, ils leur donnaient des noms tels que : group of mounds10, mound5 ...

Il était donc nécessaire de numéroter tous les points de manière claire, automatique mais aussi de façon à ce que lorsque l'on parle d'un numéro, on ait une idée de l'endroit où il se trouve ainsi que de ce qu'il désigne.

L'ensemble des points a donc été renuméroté selon des règles bien précises : des grilles ont été définies par Paulino Morales sur l'ensemble de l'image LiDAR (1 à 9), et dans chaque grille des index ont été définis (de A à F en abscisse et 1 à 6 en ordonnées pour la grille 9) pour pouvoir définir chaque quadrant.

Dans chaque quadrant, chaque point sera numéroté par le numéro de la grille (exemple : 1) suivi du quadrant où se trouve le point (exemple : A2) auquel on associera :

- Pour les architectures (monts, groupes de monts ou monts sur une place) : un chiffre

Exemple : 9A4-1

- Pour les autres formes culturelles (dépressions, places, carrières...) : une lettre

Exemple : 6A6-A

- Pour les formes naturelles (pente naturelle, drainage, escarpement) : NN

Exemple : 5B2-NN

Le numéro sera attribué à chaque ensemble architectural donc il arrive fréquemment qu'un mont soit associé à une dépression, carrière, ... Dans ce cas-là, on associe un seul numéro car on a la présence d'un mont (Figure 9).



Figure 9 : Exemple de point "Datum" et dessins associés

## II.2.3 Système de dessins

### II.2.3.1 Type de dessins

Dans le domaine de l'archéologie Méso-Américaine, la représentation des monts et des différents éléments que l'on trouve sur le terrain dépend de la manière dont l'archéologue voit les choses et a décidé de les représenter. En effet, les anciennes maisons Mayas ressemblent aujourd'hui à des monticules de terre plus ou moins gros.

Deux choix s'offrent donc :

- Une représentation où l'on décide de dessiner les choses comme on suppose qu'elles existaient au moment de l'occupation par les Mayas (Figure 10) : maisons carrées, éléments rectilignes...

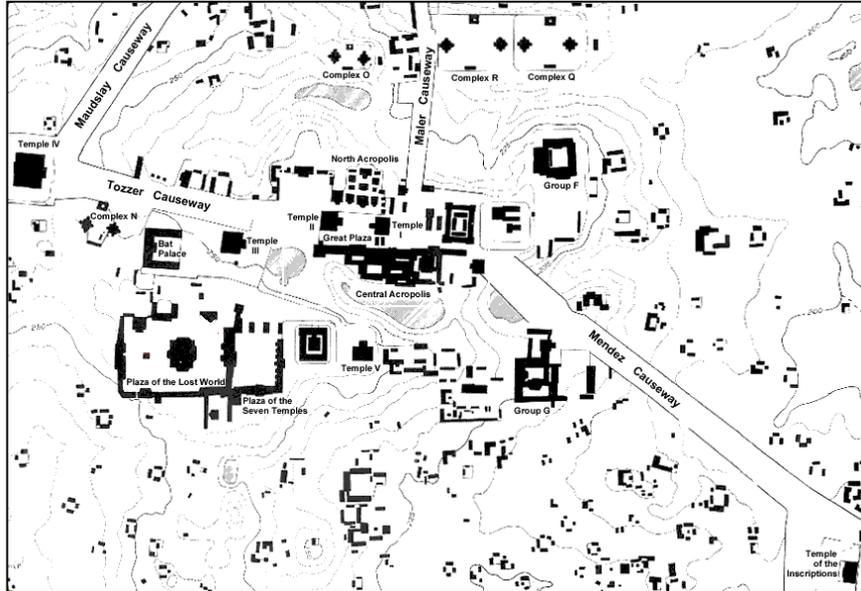


Figure 10 : Carte de Tikal (Guatemala)  
Source : Carr & Hazard, 1961

- Une représentation fidèle à ce que l'on observe sur le terrain : on dessine les choses comme on les voit (Figure 11) : Monts (représentant les structures effondrées) représentés de manière arrondie

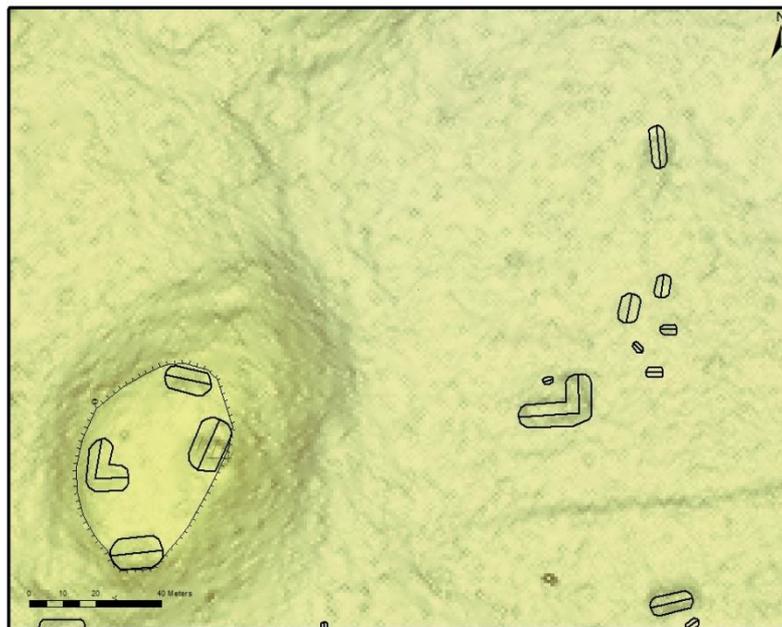
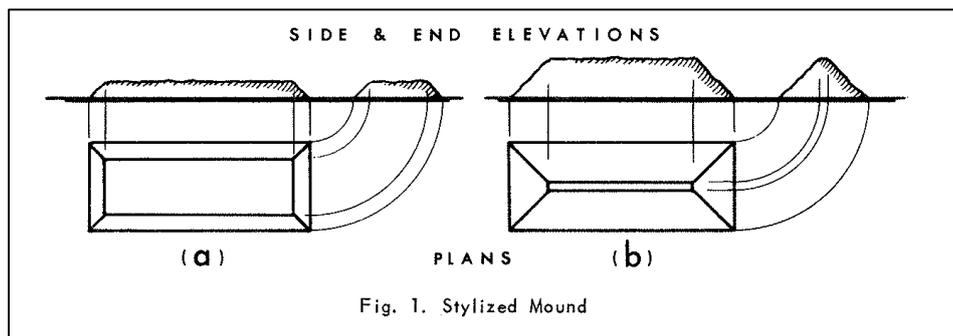


Figure 11 : Extrait de la carte d'El Pilar

Le type de site : le fait qu'il soit plus ou moins important et que les monts soient plus ou moins visibles influe sur le type de représentation à choisir. En effet, sur le site de Tikal par exemple, il y a beaucoup de monts qui sont très nets, hauts, visibles et bien délimités. Il n'est donc pas difficile d'imaginer à quoi les maisons ressemblaient. Cependant, sur le site lorsque que l'on s'éloigne des structures principales on trouve aussi de nombreux monts de faibles hauteurs. Dans leurs rapport de terrain (Carr & Hazard, 1961) expliquent que « Since corners of the average small mound were usually quite indistinguishable, the usual mapping method was to sight and plot the centers of the two ends on top for an accurate orientation and then to measure the width directly. »<sup>7</sup>. Ils parlent de la difficulté de représenter ces monts de manière correcte, mais ils ont pris le parti de le faire de la même manière que pour les grosses structures.



**Figure 12 : Représentation des monts sur le site de Tikal**

Source : Carr & Hazard, 1961

Pour le Dr. Anabel Ford, ce n'est pas correct de représenter ainsi les petites structures. Sur le site d'El Pilar – qui est un plus petit site que Tikal – les monts sont parfois très bas (20 cm) et il n'est pas toujours évident de délimiter parfaitement les contours des anciennes structures qui sont aujourd'hui des monts. Les dessins des monts de manière arrondie sont donc plus adaptés aux petites structures sur le site d'El Pilar.

### II.2.3.2 Symbologie

Les dessins réalisés jusqu'ici étaient tous dans une même table appelée « Architecture\_Paulino ». Ce fichier shapefile (type polygones) contenait tous les différents types d'architecture qui avaient été découvertes sur le terrain : monts, dépressions, places, carrières, chultun ...

De plus, les éléments de dessin n'étaient liés entre eux. Lorsque l'on voulait déplacer un mont par exemple, il était composé de 5 lignes différentes, les places étaient dessinées comme des « cils » à la main où chaque trait était séparé... Ce système de dessin n'était pas pratique donc j'ai décidé de créer des symboles adaptés à chaque type d'architecture qui permettent de manipuler, modifier les dessins plus facilement (Tableau 1) :

<sup>7</sup> « Puisque les coins des petits monts en général était souvent indiscernables, la méthode de relevés traditionnels consistait à visualiser et représenter le centre des deux extrémités sur le sommet pour une orientation correcte et alors mesurer la largeur directement. »

Tableau 1 : Symbologie des différents éléments d'architecture

| Type de structure | Style Reference | Type                                   | Symbole |
|-------------------|-----------------|--|---------|
| Place             | Caves           | Drop in floor                          |         |
| Depression        | Caves           | Depression 1                           |         |
| Quarry            | Geology 24K     | Thrust fault, 1st generation – Certain |         |
| Chich             | Caves           | Single stone alignment                 |         |
| Chultun           | ESRI            | Circle 19                              |         |
| Looter's trench   | Default         | Wall                                   |         |

Le logiciel ArcGIS n'est pas un logiciel de DAO à la base. Il permet toutefois de réaliser des dessins basiques (Figure 13) mais on en aperçoit parfois les limites : changement d'échelle lorsque l'on réalise un zoom arrière, il n'est pas possible de changer l'échelle des dessins ...

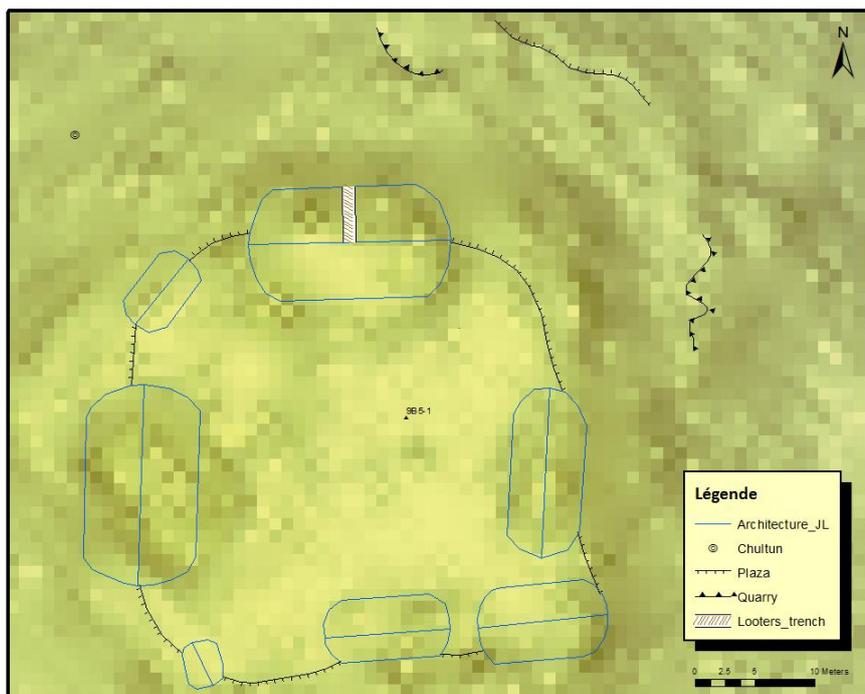


Figure 13 : Exemple de dessin

## II.3 Méthode

Chaque année, des missions sur le terrain ont lieu mais chaque stagiaire, ou personne s'occupant des relevés GPS et de leur traitement fait cela à sa manière. Il n'y a pas de continuité dans la récolte de ces données et cela manque donc de règles. Si cela est bien fait, n'importe qui sera en mesure d'ajouter à ce qui aura été fait ses nouvelles données. Cela implique une architecture dans les fichiers bien régie : noms des fichiers et des dossiers clairs et « réguliers ».

Quatres grandes étapes ont besoin d'être mises en place pour permettre un bon processus d'intégration, de collection et de traitement des données (Figure 14).

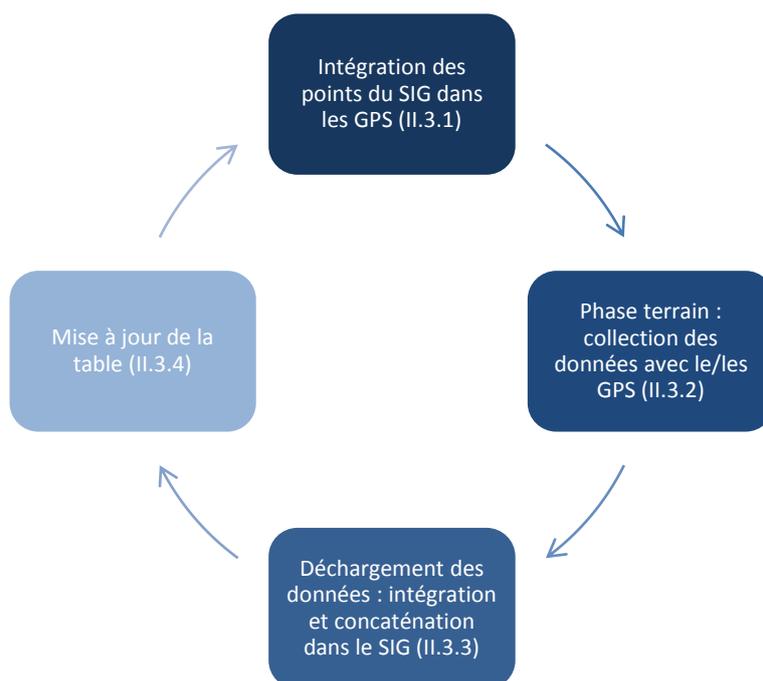


Figure 14 : Diagramme des différentes étapes à mettre en place

### II.3.1 Problèmes rencontrés en 2013

Lors de la mission 2013, le but était d'aller vérifier les points « Datum » que Johan Normark avait relevé et dessiné et de dire si ce qu'il avait représenté sur ses cartes existait ou non.

Chaque jour, les points et leurs coordonnées étaient relevés sur le SIG et reportés manuellement dans un tableau qui récapitulait les points à aller visiter. Ensuite, sur le terrain, pour chaque point à aller visiter, les coordonnées étaient entrées manuellement dans le GPS. D'autre part, les points étaient toujours enregistrés avec les numéros arbitraires qu'attribuait le GPS et en commentaires était ajoutée une description de l'objet relevé. Enfin, lors de l'import, le logiciel utilisé s'appelait BaseCamp et ce dernier

incrémentait automatiquement les numéros arbitraires enregistrés sur le terrain, ce qui compliquait d'autant plus le traitement.

Nous avons donc été confrontés à ces problèmes lorsque nous avons dû traiter certaines des données qui ne l'avaient pas été à la suite du terrain 2013. C'est d'ailleurs quelque chose qu'il ne faut pas reproduire pour la saison 2014 : il faut traiter en temps donné les données terrains récupérées, de manière claire et ne pas les laisser s'accumuler.

Le processus du transfert des points entre le SIG et le GPS était donc totalement manuel et donc par conséquent long et source d'erreurs.

Le but de cette année était de faciliter l'intégration des points dans le GPS et donc par conséquent d'aller de manière plus rapide sur les points à aller visiter.

## II.3.2 Du SIG au GPS

### II.3.2.1 Présentation du GPS et dossiers d'enregistrement

Les GPS utilisés pour aller sur le terrain sont des GPS de randonnée de type Garmin 62s. Ils ont été choisis pour leur robustesse ainsi que leur résistance à la pluie. Ce type de GPS n'est pas très intuitif et c'est donc la raison pour laquelle la saison terrain 2013 n'a pas été optimale au niveau de la collecte des données : les différents utilisateurs n'ont pas pris le temps de maîtriser le GPS. Ils ont cherché à prendre les données de la manière la plus simple et intuitive possible mais cela n'est pas une bonne solution car cela complique d'autant plus le traitement et ralentit toutes les étapes du processus.

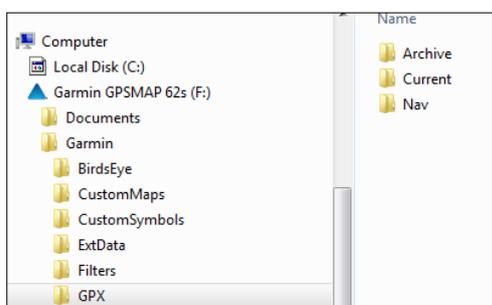


Figure 15 : Architecture des dossiers GPS

Les fichiers contenant les points que l'on trouve dans le GPS se trouvent dans le dossier GPX du GPS (Figure 15). Ce sont des fichiers au format .gpx. Tous ces fichiers se trouvent à la racine du dossier GPX.

Cependant, si l'on veut créer des dossiers cela est possible : tous les sous-dossiers du dossier GPX verront leurs points s'afficher dans le GPS. Toutefois, même si cela peut être organisé dans le dossier GPX, une fois que l'on navigue dans le GPS, il n'est pas possible de classer et ranger les points dans des dossiers. Ils apparaissent tous ensemble dans les « Waypoints » dans le GPS.

Le dossier Current contient un fichier Current.gpx créée automatiquement par le GPS qui enregistre les « Tracks » : chemin emprunté par la personne qui avait le GPS. C'est donc à cet endroit – dans le dossier GPX – que l'on va insérer les fichiers contenant les points que l'on souhaite enregistrer dans le GPS. Ces points que l'on souhaite visiter sont des points enregistrés dans ArcMap. Il faut donc convertir les fichiers situés dans la plateforme ArcMap en fichiers .gpx.

L'enregistrement des dossiers se fait selon l'architecture suivante (Figure 16):

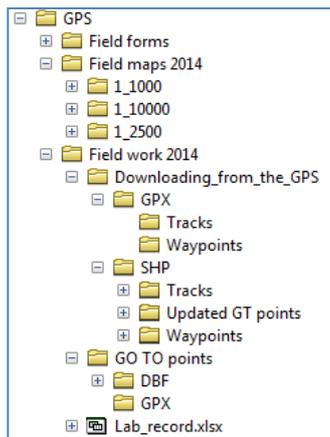


Figure 16 : Architecture de dossiers créés pour le transfert des fichiers

### II.3.2.2 Transfert des données présentes dans le SIG vers le GPS (Figure 17)

#### II.3.2.2.1 Sélection des points d'exploration sur ArcGIS : création du fichier DBF requis

Dans un premier temps, il faut sélectionner les points que l'on veut intégrer dans le GPS : tous les points ou seulement ceux qui nous intéressent selon le besoin (avec une sélection attributaire par exemple). On exporte la sélection au format .dbf (dBase table).

Dans notre cas, on veut intégrer tous les points qui se trouvent sur le site d'El Pilar : points de 2013, nouveaux points d'exploration de 2014. C'est donc une table qui doit être mise à jour à chaque fois que des nouveaux points sont importés sur le SIG et que les tables contenant les points sont modifiées.

Si on veut exporter seulement une table, on peut simplement exporter la table au format .shp.<sup>8</sup>

#### II.3.2.2.2 Passage par DNR Garmin : Création du fichier GPX

On utilise un logiciel appelé DNR Garmin qui permet de convertir des fichiers .shp, .txt, .dbf, .kml, .gpx dans l'un de ces mêmes formats. Les formats qui nous intéressent sont : .shp, .gpx et .dbf. On enregistre donc le fichier créé précédemment pour l'enregistrer au format .gpx nécessaire pour l'intégration des points dans le GPS.<sup>9</sup>

#### II.3.2.2.3 Transfert dans le GPS

Il suffit alors de copier de fichier .gpx dans le dossier GPX du GPS. Lorsque l'on va dans les Waypoints du GPS, on trouve alors les points que l'on a insérés.

<sup>8</sup> Annexe 7 : Notice de la création du fichier DBF

<sup>9</sup> Annexe 8 : Notice de la création du fichier GPX

On peut résumer le transfert des données du SIG vers le GPS de la manière suivante (Figure 16).

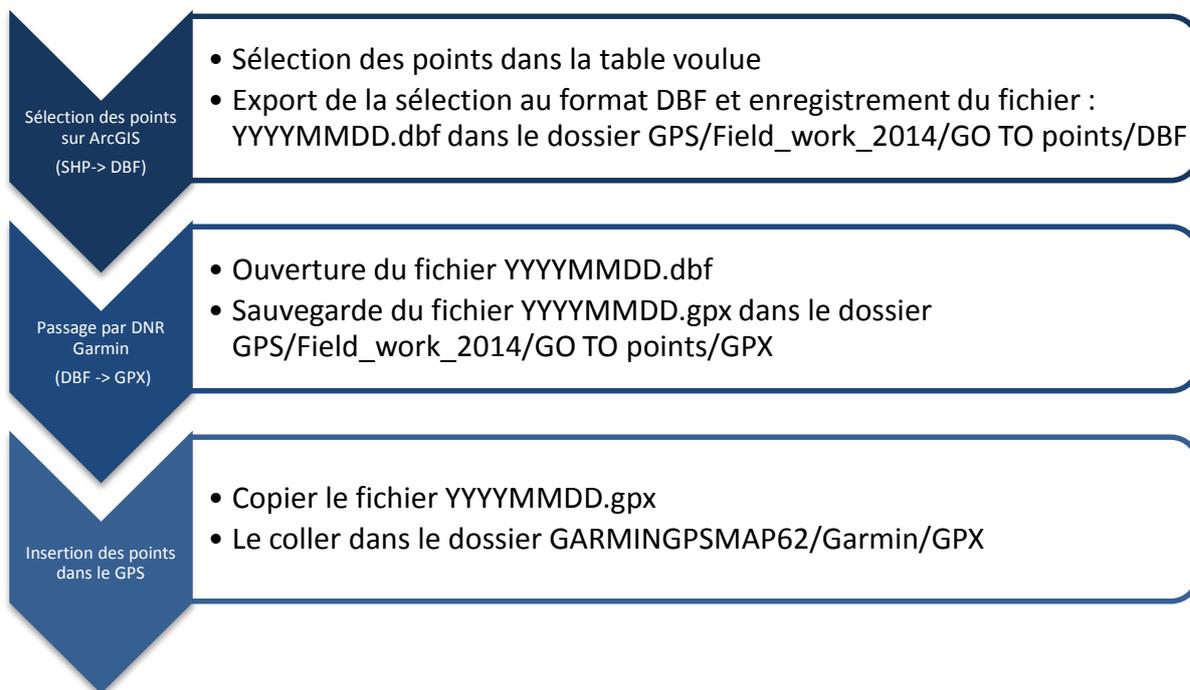


Figure 17 : Transfert SIG - GPS

### II.3.3 Utilisation du GPS sur le terrain et positionnement des points (Figure 19)

#### II.3.3.1 Environnement, limites et précision

L'utilisation du GPS dans le milieu de la jungle est particulière en raison de la végétation qui y est très dense. D'après les constructeurs, la précision serait en général de 15 m. D'après le manuel d'utilisation du fournisseur, la précision est inférieure à 10 m dans 95% des cas. On peut vérifier le nombre de satellites reçus par le récepteur GPS sur la page SATELLITES.

Nous avons relevé les informations que donnait le GPS pendant les levés en fonction de la couverture végétale que l'on pouvait observer (Tableau 2).

Tableau 2 : Réception des satellites

| Densité de la canopée | Nombre de satellites reçus | Précision affichée (m) |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Ouverte</b>        | 18                         | 3                      |
| <b>Medium</b>         | 12                         | 6,6                    |
| <b>Dense</b>          | 10                         | 10,2                   |

Dans la majorité des cas, on se trouve dans une situation où la canopée est moyenne ou dense, la précision est donc rarement inférieure à 5-6 m.

Cette précision obtenue pour nos relevés est adaptée aux relevés puisque l'on ne cherche pas à réaliser une carte de précision mais une carte d'ensemble de la zone d'El Pilar. Il y a rarement des monts qui font moins de 5-6 m. Cependant, il arrive parfois que la canopée soit dense et que la précision soit alors moins bonne que la dimension de certains monts qui ferait moins de 10 m. Ce genre de situation arrive rarement.

D'autres facteurs sont à prendre en compte par rapport à la précision des relevés effectués. En effet, la précision de la mesure ainsi que la définition du site joue aussi un rôle important : les limites des monts ne sont pas toujours bien définies. De plus, dans certains cas, chaque personne essayant de cartographier le site peut l'interpréter d'une manière différente.

### II.3.3.2 Feuilles de terrain utilisées et cartes

Trois différents types de cartes ont été réalisés pour faciliter l'orientation et le repérage des sites sur le terrain mais aussi pour la prise d'informations :

- ❖ 1:1000 : à emmener chaque jour sur le terrain. Cette échelle permet d'imprimer un quadrant par feuille. Sur chacune de ces feuilles, on a les points d'explorations que l'on a ciblés. Et on y renseigne les sites visités, le chemin emprunté au fur et à mesure des déplacements ainsi que toutes les informations qui nous paraissent nécessaires.<sup>10</sup> C'est cette carte qui sert de base à la navigation sur le terrain.
- ❖ 1:2500 : pour se repérer sur le terrain à une échelle plus grande, constituée du MNT coloré, courbes de niveau à 5 m, numérotation : A1, ..., C4
- ❖ 1:10000 : carte générale de la zone LiDAR étudiée avec le MNT colorisé et les courbes de niveau à 10 m.

Les cartes à l'échelle 1:2500 et 1:10000 sont rarement utilisées mais servent parfois pour avoir une vue d'ensemble plus générale de l'endroit où l'on se trouve.

Les différents types de feuilles de terrain à remplir chaque jour de terrain sont les suivantes :

- ❖ Feuille de suivi journalier<sup>11</sup>: Feuille sur laquelle on renseigne les personnes présentes ce jour-ci et où l'on raconte comment se passe la journée (heure d'arrivée, temps, endroits visités et commentaires).
- ❖ Feuille de contrôle des tâches journalières<sup>12</sup>: Feuille sur laquelle on renseigne les informations générales liées à chaque site visité dans la journée. Cette feuille permet de récapituler l'ensemble des sites vus dans la journée. Lorsque la journée est terminée, il faut faire la vérification terrain. On vérifie sur la feuille de contrôle des tâches journalières que tous les sites aient ou non une feuille descriptive associée.

---

<sup>10</sup> Annexe 9 : Exemple de carte utilisée (quadrant 9A5)

<sup>11</sup> Annexe 10 : Feuille de suivi journalier

<sup>12</sup> Annexe 11 : Feuille de contrôle des tâches journalières

- ❖ Feuille descriptive de chaque élément ou ensemble relevé<sup>13</sup>: On reporte sur cette feuille toutes les informations qui se réfèrent au relevé du site et son environnement. Une feuille différente est utilisée pour chaque site. Le fait de renseigner toutes ces informations donne une valeur ajoutée à ces données qui ne seraient pas aussi complètes autrement.

Ces cartes et feuilles de terrain sont indispensables à la prise d'informations sur le terrain. C'est la sauvegarde de toutes les données digitalisées par la suite.

### II.3.3.3 Navigation

Une fois les points d'exploration du SIG choisis, insérés dans le GPS (Figure 15), il suffit de choisir le point sur lequel on souhaite se diriger à l'aide de la boussole intégrée au GPS. Il faut faire attention à bien calibrer la boussole pour pouvoir naviguer correctement vers le point voulu. Et il est toujours préférable d'avoir une vraie boussole pour pouvoir confirmer ce que dit le GPS.<sup>14</sup> Et les « Master Forest Gardeners » sont la meilleure des boussoles !

### II.3.3.4 Enregistrement

#### II.3.3.4.1 Dans le GPS

Il y a différents types de points que l'on doit enregistrer avec le GPS quand on se trouve sur le terrain<sup>15</sup> :

- ❖ Les points « Datum »

Ce sont les points qui signalisent le site ainsi que tous les éléments qui s'y rapportent. Il a été décidé en 2013 que ce point serait positionné au sommet du mont le plus haut de l'ensemble. Si on relève une dépression, ce sera le point le plus bas qui sera retenu. On peut enregistrer ce point de deux manières différentes :

- ✧ Si le point était déjà enregistré dans le GPS et que l'on souhaite modifier sa position, il est possible de repositionner le point.
- ✧ Si c'est un nouveau point, il faut l'enregistrer en tant que nouveau point. En ce qui concerne la numérotation, on utilise les quadrants (9A4-..) et on ajoute une lettre : Z quand on ne sait pas quelle était la dernière lettre utilisée, sinon on numérote à la suite de la dernière lettre. Suivre de près cette numérotation est important pour éviter les duplications.

- ❖ Les points de dessin

Les premiers jours de terrain ont servi de test pour savoir comment allaient être enregistrés les points qui serviraient à faire les dessins.

---

<sup>13</sup> Annexe 12 : Feuille descriptive des éléments relevés

<sup>14</sup> Annexe 13 : Notice pour la navigation dans le GPS

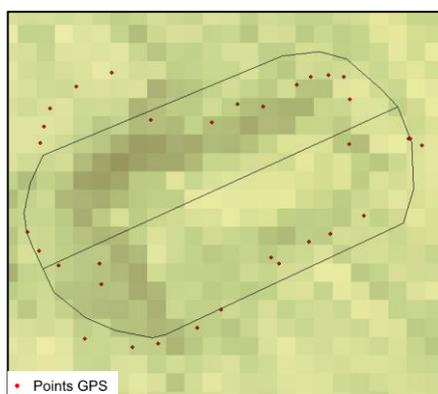
<sup>15</sup> Annexe 14 : Notice pour l'enregistrement des points dans le GPS

Sur les GPS, deux méthodes peuvent être utilisées pour enregistrer les points : on peut enregistrer le point simplement ou bien utiliser une méthode de positionnement moyen.

Deux méthodes ont été testées :

Premièrement nous avons pensé que la méthode la plus précise et la plus pratique pour dessiner serait d'enregistrer 4 points en positionnement moyen pour chaque coin du mont. Cependant au déchargement des données, on s'est rendu compte qu'avec quatre points – même s'ils avaient été pris de manière la plus précise possible – ce n'était pas suffisant et il ne nous était pas possible de dessiner.

Nous avons donc décidé d'enregistrer les points simplement mais en grand nombre tout autour du mont. En général, l'ensemble des points délimite les formes culturelles de manière plus ou moins correcte et aide au dessin (Figure 18).



**Figure 18 : Exemple de points GPS qui ont permis de dessiner**

Une fois que les points du site sont enregistrés, on peut alors se diriger vers le point suivant et répéter les mêmes étapes.

#### **II.3.3.4.2 Fichiers de sortie du GPS**

À la fin d'une journée de récolte d'informations, on trouvera deux fichiers dans le dossier GPX du GPS :

- ❖ Le fichier YYYYMMDD.gpx qui avait été inséré la veille avec les points d'exploration du SIG mais qui aura été mis à jour si des points ont été repositionnés.
- ❖ Un nouveau fichier que le GPS crée avec les nouveaux points : WAYPOINTS\_DD-MONTH-YY.gpx. Ce dernier va donc contenir :
  - ✧ Les nouveaux points « Datum »
  - ✧ Les points de dessin

### II.3.3.5 Organisation des équipes sur le terrain

Selon les jours de travail sur le terrain, l'organisation des équipes peut être différente. On peut trouver deux types de configuration : des équipes de 2 personnes et des équipes avec plus de monde selon le travail à réaliser.

Selon le type d'organisation, le déchargement des données sera différent : un seul traitement s'il n'y a eu qu'une seule équipe et un seul GPS utilisé. Sinon deux traitements séparés qui nécessiteront une concaténation par la suite.

Le fait que deux équipes travaillent séparément ne pose pas problème tant que les zones de travail sont distinctes.

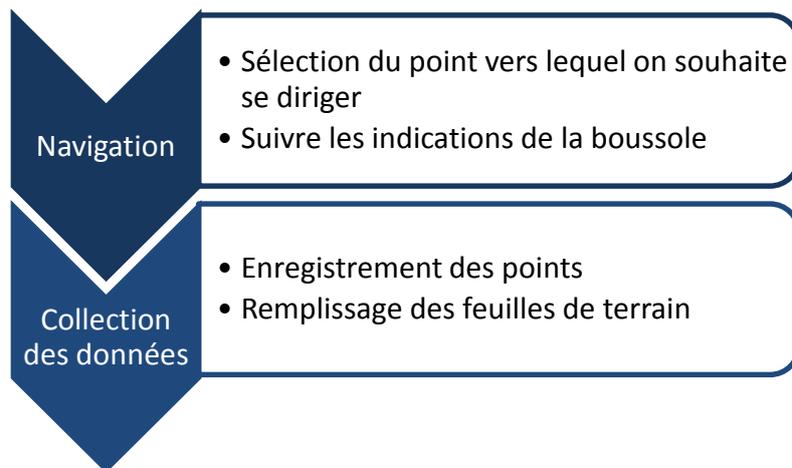


Figure 19 : Phase terrain de collection des données

### II.3.4 Déchargement des données : GPS au SIG (Figure 20)

#### II.3.4.1 Déchargement des données : intégration au SIG<sup>16</sup>

À la fin de la journée terrain, on obtient deux fichiers GPX détaillés précédemment (II.3.3.4.2). L'objectif est donc d'intégrer les points relevés sur le terrain dans le SIG de la forêt Maya.

##### II.3.4.1.1 Sauvegarde et conversion des fichiers bruts obtenus la journée

Pour avoir des archives de tout ce qui a été fait et ne pas perdre d'informations, on enregistre les fichiers GPX de la journée (Points et « Tracks »). Une fois l'enregistrement effectué, on peut convertir les fichiers GPX en fichier SHP pour leur intégration dans le SIG de la forêt Maya. Pour cela on utilise à nouveau le logiciel DNR Garmin qui permet de convertir le type de format de fichiers qui nous intéressent (.shp et .gpx). On convertit tous les fichiers cités précédemment au format SHP.

<sup>16</sup> Annexe 15 : Notice pour l'intégration des données GPS dans le SIG

### II.3.4.1.2 Géoréférencement des fichiers shapefile et intégration dans le SIG

La conversion des fichiers shapefile avec le logiciel DNR Garmin ne géoréférence pas automatiquement les fichiers qu'il crée. Il faut donc passer par ArcCatalog pour le faire. Les fichiers sont maintenant prêts pour être intégrés dans la plateforme SIG de la forêt Maya.

On peut alors importer toutes les couches dans ArcMap. On peut récapituler ce que contient chaque fichier. Ce sont donc les fichiers SHP bruts : toutes ces données vont permettre de corriger les dessins existants, d'ajouter des nouveaux sites relevés, ainsi que de géoréférencer les nouvelles données à l'aide des points « Datum ».

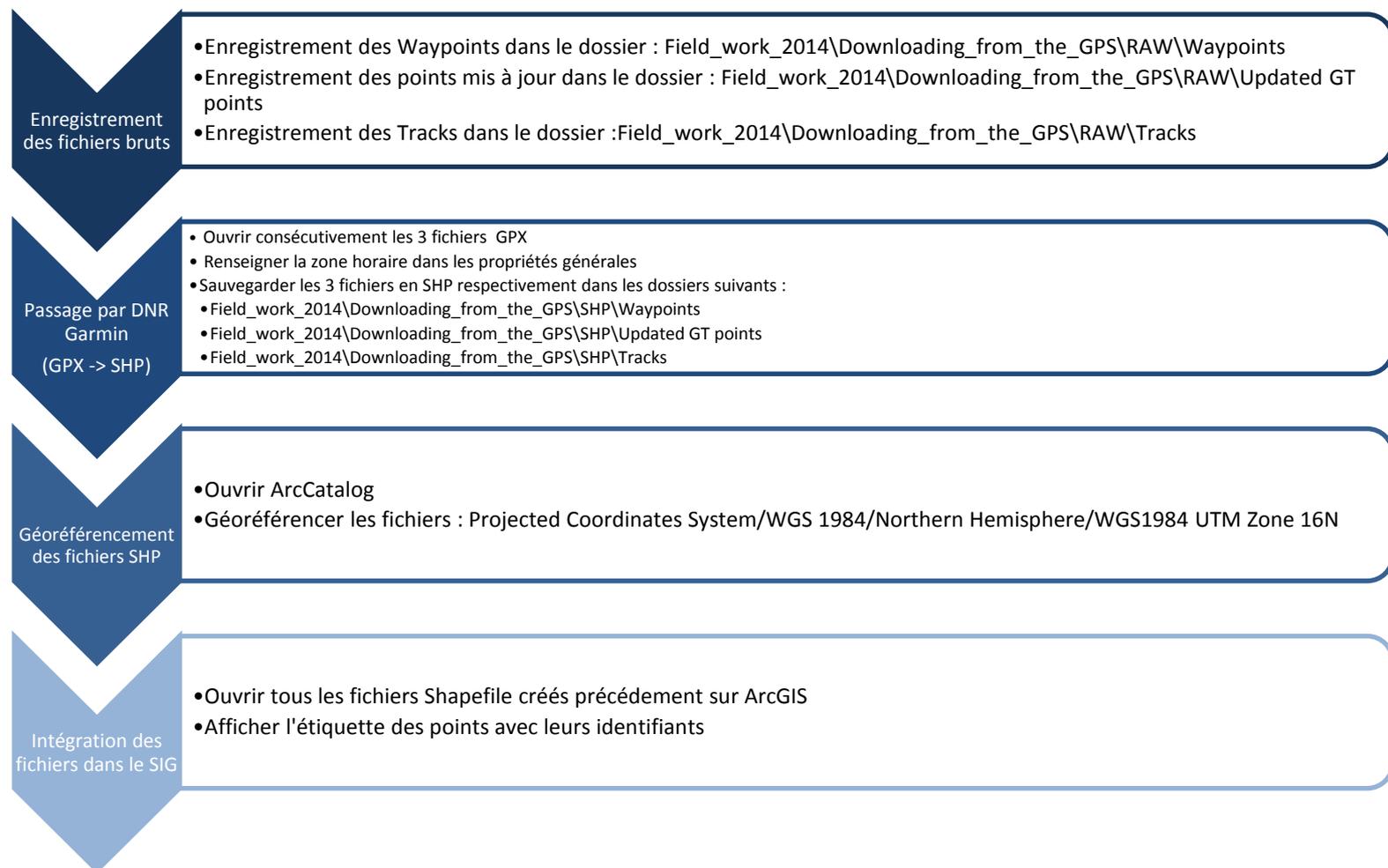


Figure 20 : Déchargement des données : GPS au SIG

### II.3.5 Concaténation et gestion des données des différents utilisateurs dans le SIG

Une fois toutes les données insérées dans le SIG, il faut les traiter : nettoyer, trier et réorganiser. Il va falloir traiter ces données en termes de points « Datum » ainsi qu'en termes de dessins.

#### II.3.5.1 Traitement des points

Dans le SIG, trois tables de base sont présentes : WEP\_2014 qui contient tous les points déjà existants ; Mapping qui contient les points qui permettent de dessiner ; Tracks\_2014 qui contient toutes les routes empruntées sur le terrain.

C'est une personne désignée qui va s'occuper de gérer ces tables ainsi que la concaténation avec les données des autres utilisateurs. Les points collectés chaque journée vont se trouver dans des fichiers bruts mentionnés précédemment :

Waypoints\_DD-Month-YY\_GPSX.shp ainsi que YYYYMMDD\_Updated.shp.

Chaque utilisateur va traiter ses données de la journée (Etape 1) et c'est ensuite la personne chargée de la gestion des données qui va rassembler toutes les informations dans les trois tables de base et qui va ainsi les mettre à jour régulièrement (Etape 2). On peut résumer la situation par le diagramme suivant (Figure 21):

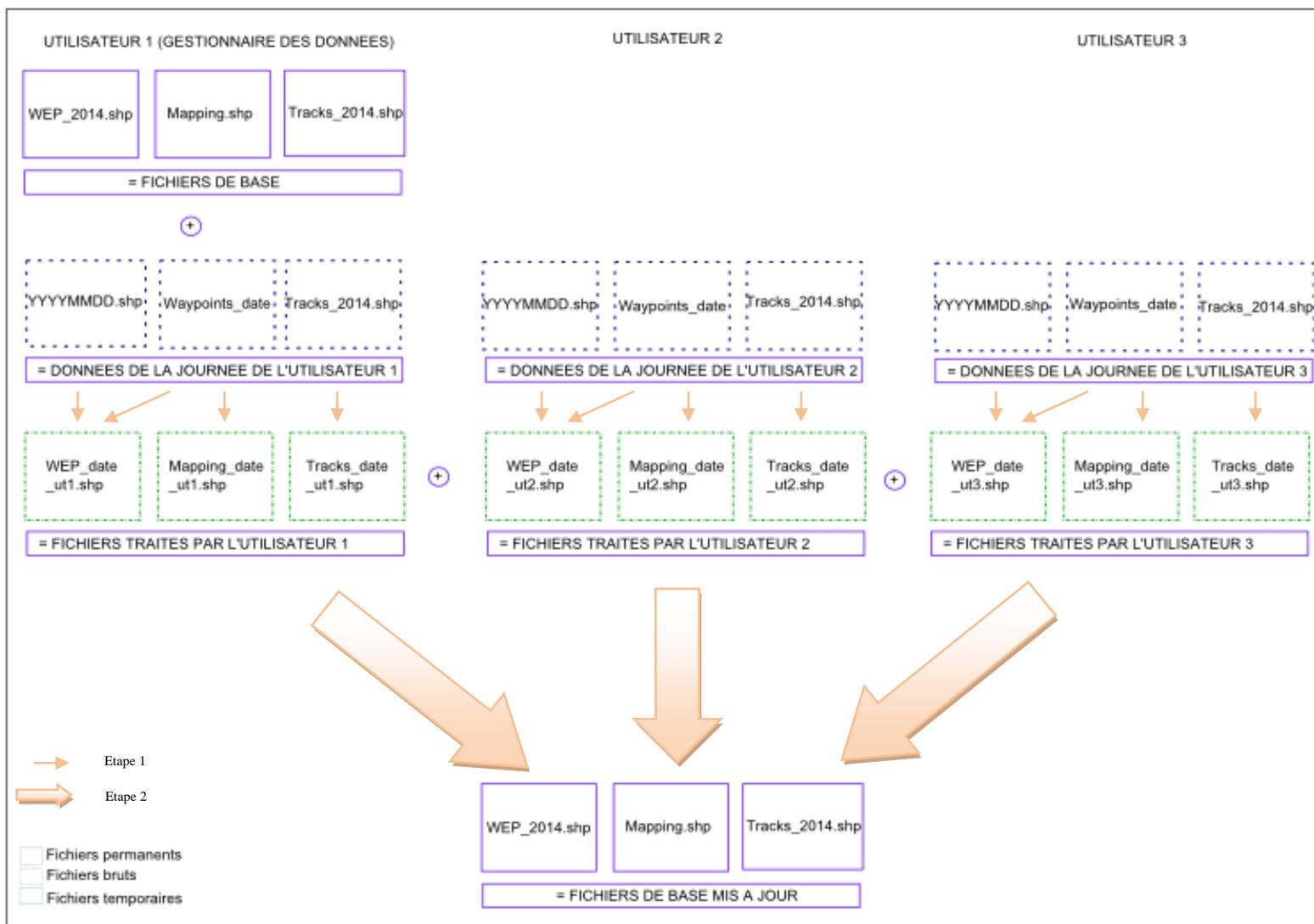


Figure 21 : Diagramme récapitulatif du processus de gestion des données

Les différentes étapes sont détaillées dans l'annexe 16.

### II.3.5.2 Traitement des dessins

Une fois que les points de dessins sont clairs, on peut réaliser les dessins propres à chaque site. Différents éléments vont permettre de réaliser les dessins les plus adaptés et précis possible : L'image LiDAR, les points GPS (Figure 22) pris pour dessiner le site ainsi que le croquis réalisé sur le terrain (Figure 23).

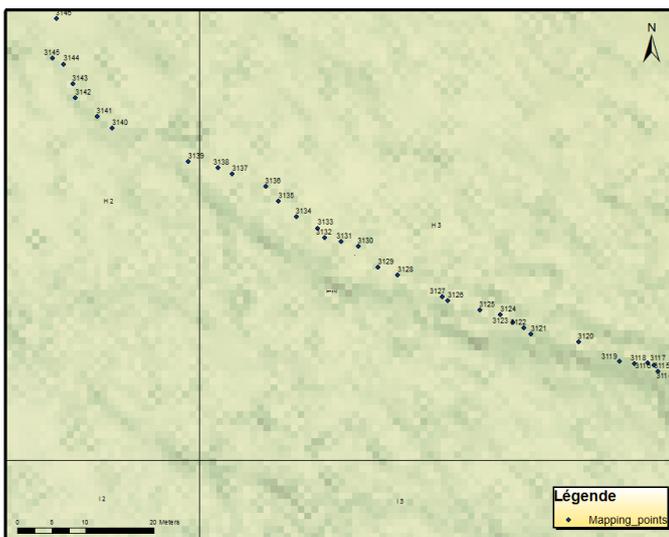


Figure 22 : Visualisation des points GPS  
Source : ArcGIS

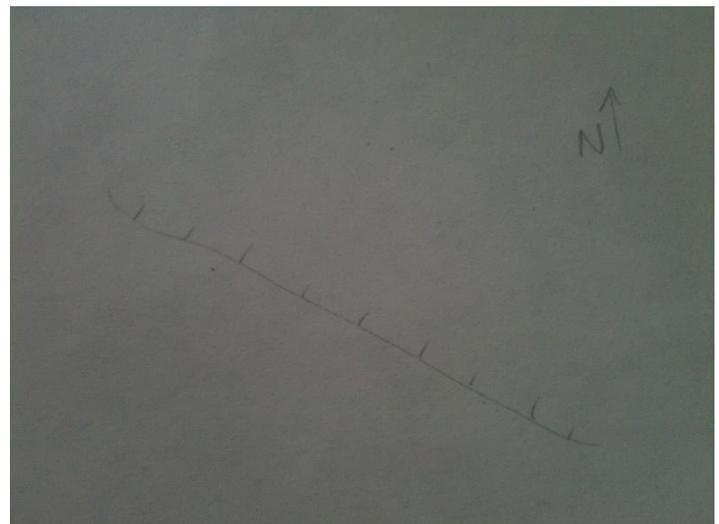


Figure 23 : Croquis réalisé sur le terrain

Comme pour les points, chaque utilisateur va réaliser ses propres dessins, les enregistrer et les transmettre au gestionnaire des données qui va alors tout récupérer et tout concaténer dans les tables de base contenant toutes les architectures. Il s'assurera que les dessins sont conformes aux croquis réalisés sur le terrain.

### II.3.6 Application des méthodes

Nous avons donc utilisé ce protocole pour deux missions différentes : dans un premier temps, la rectification de la carte réalisée en 2001 mais aussi pour l'exploration de nouveaux points susceptibles d'être des éléments d'architecture Maya.

Nous avons couvert au total une aire de 220 hectares de relevés centrés autour du site principal d'El Pilar pour l'année 2014. En 2001, les relevés ont couvert une aire de 120 hectares (Figure 24).

Les relevés effectués en 2014 ont nécessité 22 jours de terrain et 11 jours de bureau donc une moyenne de 10 hectares était relevée chaque jour de terrain. De plus, à la fin de la saison, toutes les données ont été traitées, intégrées au SIG et les traitements

parallèles ont été effectués. En général, un jour de bureau était nécessaire après deux jours de terrain même si les données étaient déchargées par chaque utilisateur à chaque fin de journée.

En 2001, les relevés pour couvrir 120 hectares ont durés 34 jours. Mais cette mission terrain a seulement consisté à relever les sites sur le terrain et les cartographier mais aucun traitement supplémentaire n'a été réalisé. La compilation de ces dessins, la numérisation des notes papiers ainsi que leur intégration au SIG ont été réalisées plus tard.

En 2013, la mission terrain a nécessité plus de jours de terrain qu'en 2014 et pourtant, les données récoltées n'étaient pas utilisables et pas aussi complètes.

On peut donc en conclure que le protocole mis en place est efficace : peu de jours de terrain nécessaire pour une surface couverte importante et des données traitées et utilisables par la suite. Et pourtant, cette année a consisté à expérimenter le processus, cela signifie qu'il peut être encore plus efficace. Les années suivantes, il pourra donc être utilisé pour aller explorer de nouveaux points et d'effectuer des relevés de manière efficace pour agrandir et compléter la carte du site d'El Pilar.

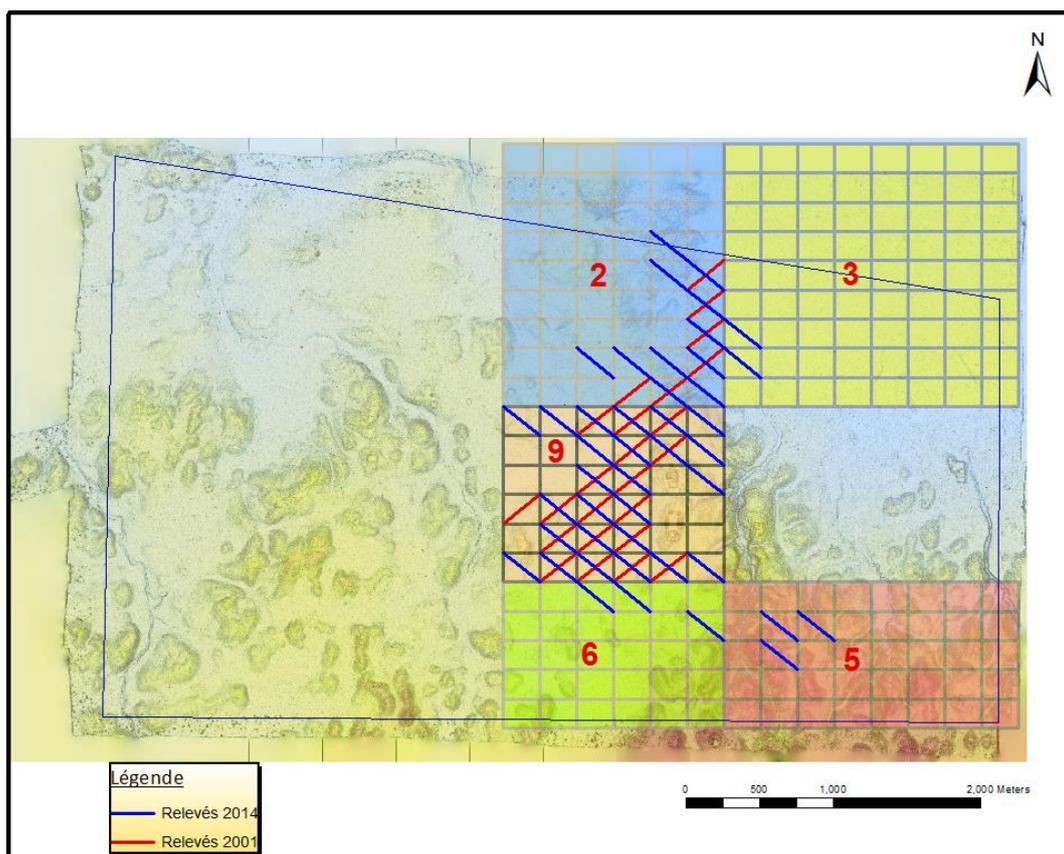


Figure 24 : Ensemble des quadrants relevés en 2001 et en 2014

On peut donc comparer les différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour cartographier ce type de site archéologique dans la jungle (Tableau 3) :

**Tableau 3 : Comparaison des différentes méthodes de relevés**

|                          | Méthodes traditionnelles  |   |  |
|--------------------------|---|---|--|
|                          | Méthode 2001  | Goniographe   | Méthode 2014   |
| Moyens à disposition     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Boussole</li> <li>- Transit</li> <li>- SIG</li> </ul>  | Goniographe   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Image LiDAR</li> <li>- SIG</li> </ul>   |
| Acquisition des données  | Croquis et boussole   | Goniographe   | GPS et feuilles de terrain   |
| Traitement des données   | <p>À la fin de la saison :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Numérisation des dessins sous AutoCAD</li> <li>- Géoréférencement et intégration dans le SIG</li> </ul> | Immédiat  | <p>En même temps que le déchargement des données :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intégration dans le SIG (points et dessins)</li> </ul> |
| Précision                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 cm pour les points</li> <li>- 5-10 m pour les dessins</li> </ul>  | ++  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5-10 m pour les points</li> <li>- 5-10 m pour les dessins</li> </ul>  |
| Efficacité de la méthode | 120 ha en 34 jours (sans les traitements)   | 16 km <sup>2</sup> en 4 ans   | 220 ha en 33 jours   |
| Avantages                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Points de données précis</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas besoin de temps de bureau pour traiter les données</li> <li>- Pas besoin de notes de terrain</li> <li>- Plus précis</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Objectif précis</li> <li>- Efficace</li> <li>- Conservation de la forêt</li> </ul>                            |
| Inconvénients            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Destruction de la forêt</li> <li>- Long processus de traitement des données</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tout le travail dépend des conditions météorologiques</li> <li>- Très long</li> <li>- Destruction de la forêt</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Il faut bien prévoir les zones de relevés</li> </ul>  |

La comparaison de ces différentes méthodes nous montre que chacune possède un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Cependant, la méthode mise en place en 2014 est réellement plus efficace. En effet, si on décidait de cartographier toute la réserve d'El Pilar (une vingtaine de kilomètres carrés), cela demanderait environ 300 jours de travail (temps de relevés sur le terrain ainsi que traitement des données).

C'est donc beaucoup moins que les méthodes de relevés traditionnels : en un an on pourrait relever plus que ce qui a été fait en 4 ans à Tikal. La méthode utilisée sur le site de Tikal a demandé beaucoup de temps car la précision et les détails étaient recherchés : « The rather slow progress of the mapping was due to great accuracy and detail desired » (Carr & Hazard, 1961)<sup>17</sup>. Cependant, pour le type de relevés archéologique que l'on effectue ce niveau de précision et de détails n'est pas indispensable. De plus, le fait que l'on ait choisi de représenter les monts de manière arrondie implique que l'on n'ait pas une connaissance parfaite des monts et donc une telle précision n'est pas nécessaire. Avec cette méthode, il faudrait 1200 jours pour avoir une carte des 20 kilomètres carrés du site d'El Pilar.

La méthode utilisée en 2001 nous a demandé le même nombre de jours de travail pour une aire relevée moins importante. De plus le travail de bureau qui s'ensuit n'est pas inclus dans ce temps de travail. Au niveau de la précision, on se trouve dans un même ordre de grandeur que dans notre méthode utilisée en 2014 pour la représentation des monts. De cette manière il faudrait 566 jours pour relever les 20 kilomètres carrés de la réserve d'El Pilar (sans les traitements).

Notre méthode utilisée en 2014 est donc nettement plus efficace et la précision que l'on obtient est peut-être moins bonne que celle des méthodes traditionnelles mais elle est suffisante aux types de relevés archéologiques que l'on effectue. Enfin, cette méthode a un avantage considérable : elle permet de conserver de la forêt.

---

<sup>17</sup> «La progression plutôt lente des relevés était due à la grande précision et au niveau de détail désiré. »

### III. Analyse : Comparaison de la carte de 2001 et de 2014

#### III.1 Précision du dessin

Nous avons décidé de comparer la carte de 2001 avec celle de 2014 du point de vue du nombre de monts – preuves des anciennes structures Mayas – (Tableau 4). Le calcul a été fait sur une aire de 110 hectares qui représente la zone de recouvrement des deux cartes.

Tableau 4 : Comparaison du nombre de monts entre 2001 et 2014

| Nombre de monts |      |
|-----------------|------|
| 2001            | 2014 |
| 220             | 215  |

On remarque que l'on a un nombre similaire de monts après les deux campagnes de relevés sur une même zone : 245 en 2001 et 251 en 2014 (Tableau 4). On a donc des données comparables en termes de quantité : un certain nombre de monts sont les mêmes mais re-cartographiés, mais certains sites relevés en 2001 ont été supprimés et d'autres ajoutés en 2014. Cela amène donc à un résultat semblable : 6 sites différents.

On a donc des zones très semblables entre les deux cartes où l'on remarque très peu de décalages et de modifications effectuées (Figure 25). On compte en moyenne un décalage de 10 m entre les deux dessins. Cela paraît très peu sachant que la précision du GPS est de 7 m. Autrement l'orientation des structures est plutôt correcte.

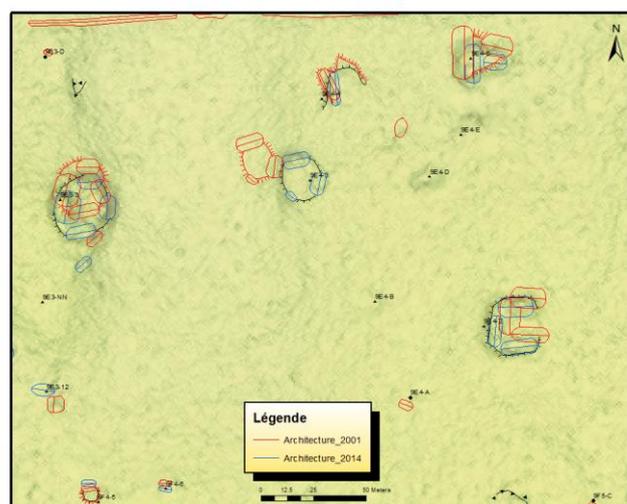
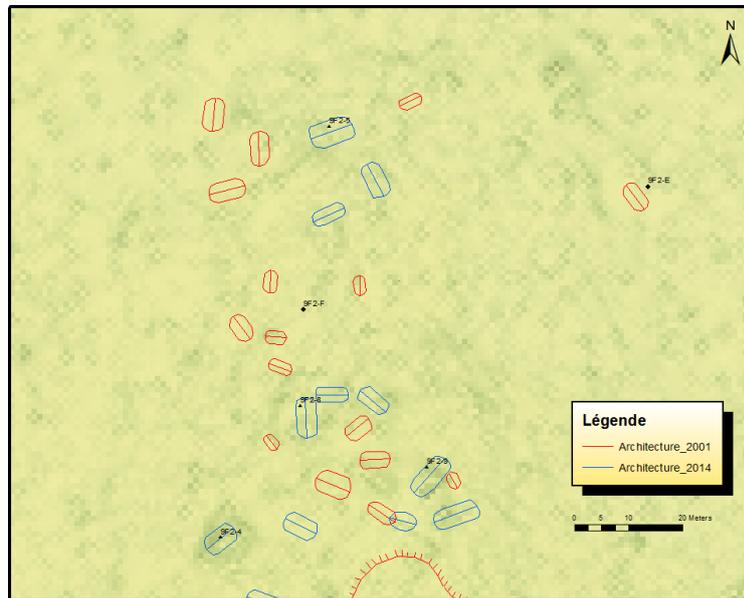


Figure 25 : Décalage entre les relevés de 2001 et 2014

Malgré un nombre similaire de monts et certaines zones plutôt correctes, certaines zones montrent des imprécisions au niveau du positionnement des monts sur la carte de 2001. Les monts ne sont pas seulement mal positionnés de manière générale

(leur position n'est pas bonne) mais ils ne sont pas correctement orientés relativement les uns par rapport aux autres. Une zone illustre particulièrement bien ces problèmes de position (Figure 26) :



**Figure 26 : Décalage entre les relevés de 2001 et de 2014**

On voit bien que les monts sont éparpillés sur la carte de 2001 : on compte 16 monts individuels qui ne semblent pas être en relation les uns avec les autres. Après avoir cartographié de nouveau la zone en 2014, l'organisation des différents ensembles semble plus logique et compréhensible.

Dans cette zone en particulier – mais c'est aussi le cas d'autres – la façon dont les monts étaient relevés n'était pas forcément adaptée : les personnes qui participaient aux levés terrain ne cherchaient pas forcément à comprendre la disposition des monts entre eux avant de les relever. Pourtant, c'est la base des relevés : la première chose à faire en arrivant au niveau d'un site c'est regarder dans un premier temps ce que l'on trouve autour du point atteint. Il faut le faire dans un rayon d'environ 20 m pour vérifier la présence d'autres éléments : autres monts, places, dépression, ... afin de comprendre l'organisation du site. Une fois que l'on a une idée claire de ce qu'il se passe, on peut réaliser le croquis et relever les points au GPS.

## III.2 Influence de la précision sur la densité

### III.2.1 Calcul classique de la densité des structures

La plupart des archéologues qui s'intéressent aux Mayas calculent la densité des monts en comptant chaque maison. Chacune d'elle représente une unité. Ce calcul nous donne une densité d'environ 200 monts par kilomètre carré. Sur le site de Tikal, la densité moyenne est de 235 structures par kilomètre carré. Sur ces deux sites, la densité des structures est donc similaire bien que Tikal soit un centre Maya plus important.

### III.2.2 Nouveau calcul

Cependant, si on prend en compte la différence entre les différents types d'architecture (mont unique, ensemble de monts ainsi que le nombre de monts constituant l'ensemble), il paraît plus judicieux de calculer la densité d'une autre manière.

Par exemple en utilisant les unités résidentielles – c'est-à-dire les ensembles de monts. On compte en 2014 alors 110 ensembles. Dans les ensembles de plusieurs monts on compte en moyenne 1,9 structures par ensemble de monts. En se basant sur ces ensembles, on obtient une densité d'environ 100 ensembles par kilomètres carrés.

Lorsque que l'on compte les ensembles et non pas les structures individuelles cela change totalement les conclusions sur la densité des monts et donc les estimations de la population Maya qui peuvent être faites.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif du nombre de monts et de leur densité

|                             | Calcul par mont |      | Calcul par unité |      |
|-----------------------------|-----------------|------|------------------|------|
|                             | 2001            | 2014 | 2001             | 2014 |
| Nombre de monts             | 220             | 215  | 122              | 110  |
| Densité par km <sup>2</sup> | 200             | 195  | 110              | 100  |

La méthode de cartographie utilisée en 2001 et en 2014 donne donc des résultats similaires en ce qui concerne la quantité et la densité. C'est lorsque l'on s'intéresse à la position, l'orientation et l'organisation des monts entre eux que la carte de 2001 n'est pas correcte.

Le tableau 5 nous montre que malgré le fait d'utiliser la carte de 2001 ou de 2014, cela n'influe pas sur le nombre de monts ou leur densité. C'est lorsque l'on décide de compter par mont ou par unité que les résultats varient.

On peut maintenant s'intéresser aux différents facteurs qui peuvent faire qu'une zone soit plus ou moins densément peuplée ou non.

### III.2.3 Facteurs influant sur la densité des monts

Sur le terrain, nous récoltons des informations pour chaque site qui pourrait avoir une influence sur la répartition de la densité des monts : la végétation ainsi que la topographie.

### III.2.3.1 Végétation

En ce qui concerne la végétation, nous notons d'une part : la densité de la canopée et de la sous-végétation (ouverte, medium, dense) mais nous intégrons aussi tous les arbres présents au niveau du site grâce aux « Master Forest Gardeners ».

Les arbres que nous relevons se différencient en deux catégories :

- Les 20 arbres dominants de la forêt Maya (Figure 27) : ce sont les arbres que les Forest Gardeners – descendants des Mayas – utilisent encore de nos jours dans leurs jardins et qui possèdent de nombreuses qualités (médicinales, nourriture...). On suppose donc que les Mayas possédaient aussi ce type d'arbres autour de leurs habitations.
- Les autres arbres

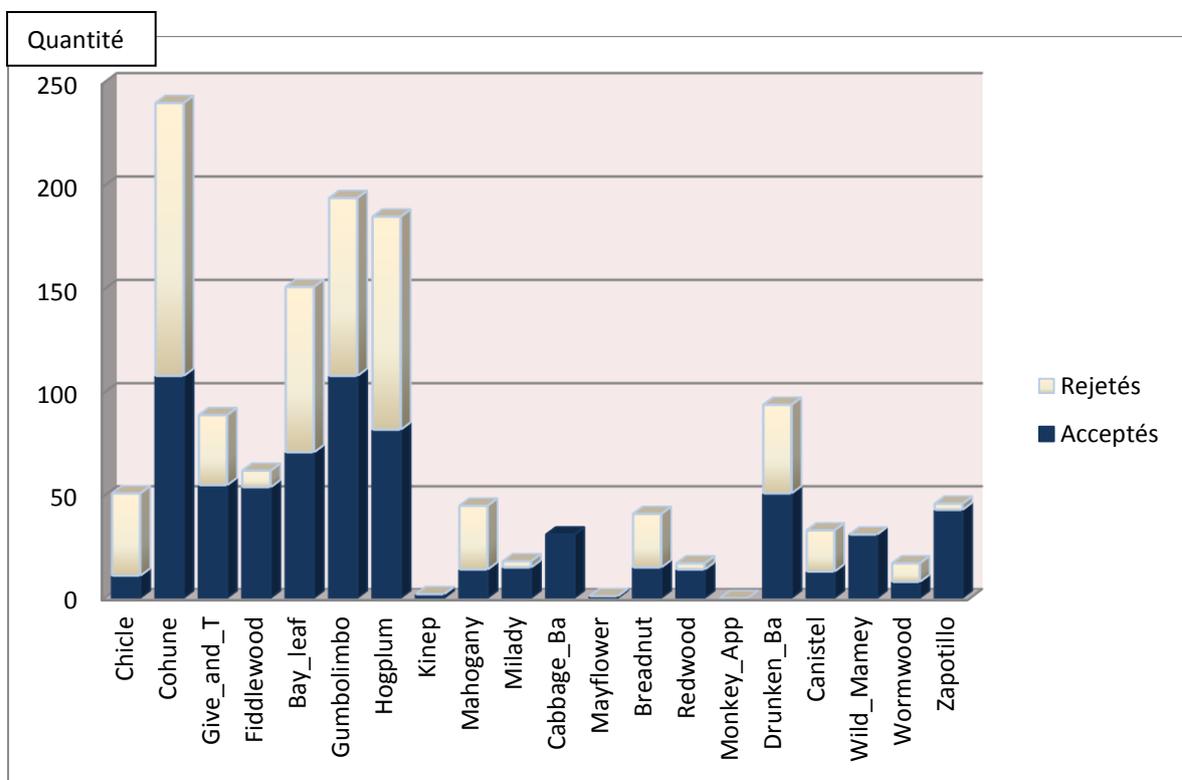


Figure 27 : Graphique représentant la quantité d'arbres présents selon la présence ou non de site

Source : Terrain 2014

On remarque que la majorité des arbres du graphique précédent (Figure 27) sont présents en plus grandes quantités au niveau des sites acceptés.

Toutefois, certains sont présents dans les mêmes quantités. C'est le cas des Cohune, Bay Leaf et Hogplum. Le Cohune est un palmier très présent dans la forêt Maya. Il se distingue des autres arbres par le fait qu'on peut le trouver dans deux types d'environnements très différents. On le trouve dans des zones plates en grande quantité : dans ces zones, c'est l'espèce prédominante et on trouve peu d'autres espèces. Ce sont en général des zones où l'on trouve peu de monts. Pourtant, sur l'image LiDAR, on est souvent amené à aller

dans ces zones car on pouvait voir quelque chose de suspect sur l'image LiDAR. Souvent ces points se révèlent être le débris des Cohune qui forment un monticule au pied de l'arbre. Toutefois on trouve aussi ces palmiers au niveau de nombreux sites car ils sont aussi synonymes de terres fertiles et se trouvent dans des zones où le sol retient l'eau. Cela explique donc le fait que l'on trouve autant de Cohune au niveau des sites acceptés que des sites rejetés.

Les autres arbres qui sont plus présents au niveau des sites rejetés sont le Chicle ainsi que l'Acajou. Des études (Ford and Nigh, à paraître) ont montré que ces deux espèces d'arbres sont présentes en grande quantité dans les zones marécageuse et donc non habitables (Figure 28). Sur cette figure la zone grisée représente les endroits où l'on est le plus susceptible de trouver des formes culturelles.

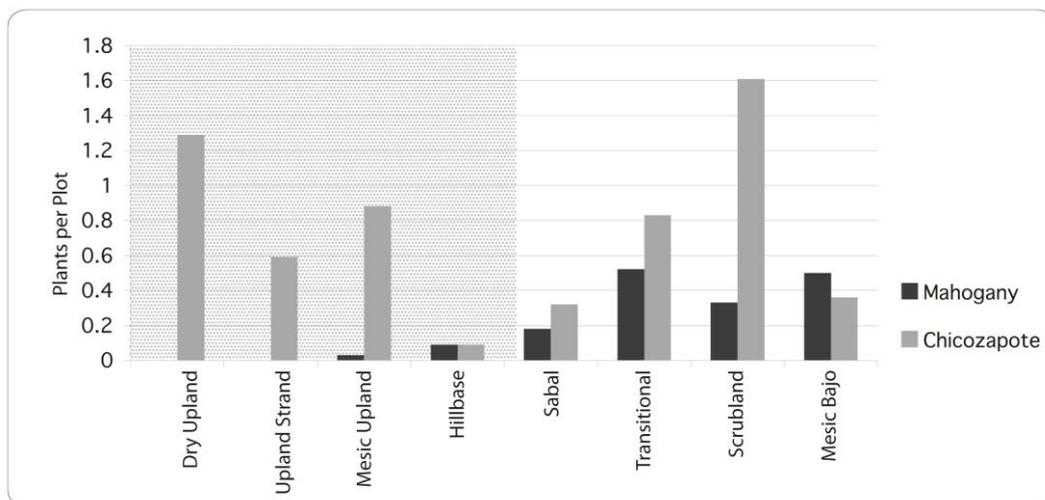


Figure 28 : Graphique représentant la quantité d'acajou et de Chicle selon l'habitat

Source : Ford and Nigh, à paraître

Les autres données que l'on a relevées sur le terrain sont la densité de la canopée et de la sous-canopée.

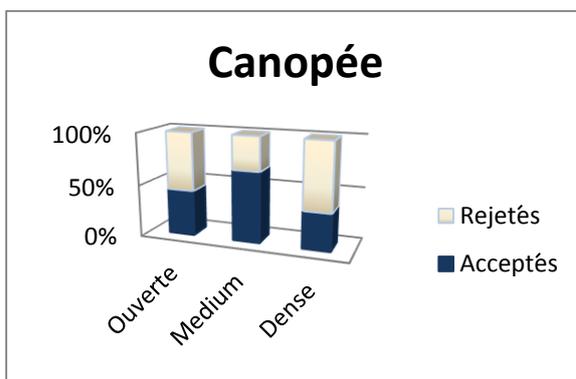
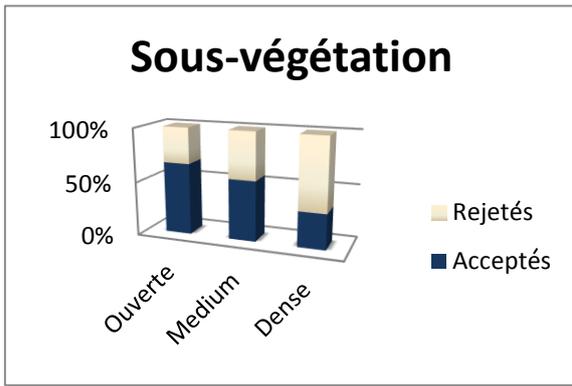


Figure 29 : Proportion de monts acceptés ou rejetés selon la densité de la canopée

On a relevé la densité de la canopée au niveau de chaque site qu'il soit accepté ou rejeté (Figure 29). On remarque que les monts se trouvent majoritairement dans des zones où la canopée est moyenne : ni trop ouverte, ni trop dense.



On a fait de même pour la sous-végétation et il en ressort que ce sont les zones de sous- végétation ouverte qui sont majoritaires (Figure 30).

Figure 30 : Proportion de munts acceptés ou rejetés selon la densité de la sous-végétation

### III.2.3.2 Topographie

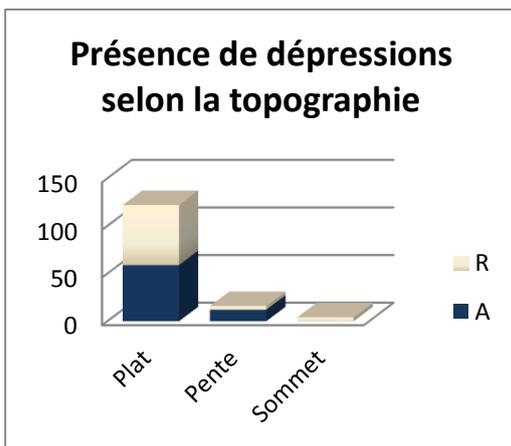


Figure 31 : Proportion de carrières acceptés ou rejetés selon la topographie

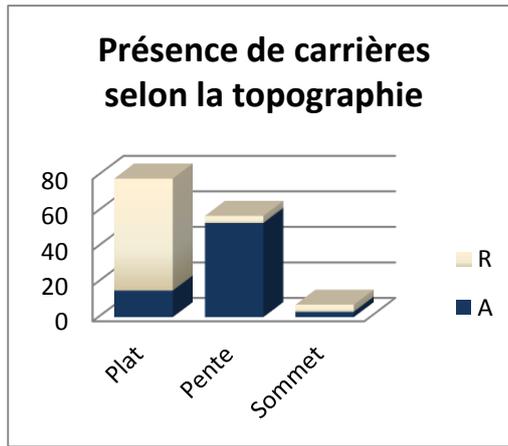


Figure 33 : Proportion de dépressions acceptés ou rejetés selon la topographie

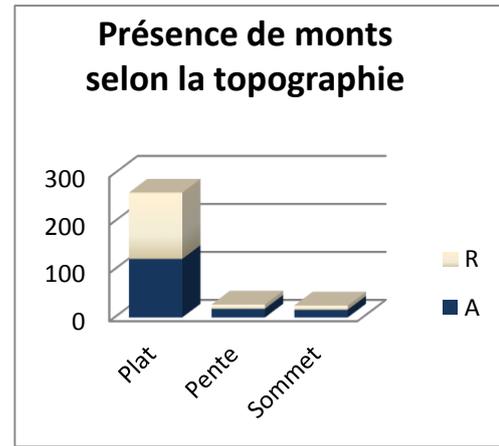


Figure 32 : Proportion de munts acceptés ou rejetés selon la topographie

Il ressort des données collectées sur le terrain que les munts se trouvent majoritairement dans des zones plates. Cependant, on en trouve aussi un grand nombre aux sommets des collines. On ne retrouve pas ces informations dans le graphique (Figure 33). Cela est dû au fait que les zones relevées aient été en majorité des zones plates.

Les carrières, elles, se trouvent dans des zones pentues sur les côtés des collines : entre chaque zone d'habitations. C'est là que les Mayas allaient chercher leur matériels pour construire leurs habitations.

Les dépressions quant à elles se trouvent plus dans les zones plates. Ces dépressions servaient de réserves d'eau, de moyen de stockage.

### III.3 Intérêt de la nouvelle méthode

On a donc pu voir comment la cartographie des sites Mayas a évolué au fil des années. D'abord des méthodes classiques sur papiers (goniographe et cheminement) et ensuite, avec l'arrivée des nouvelles technologies comme le LiDAR, certains archéologues ont vu cela comme une révolution.

Cependant, il faut être prudent avec cette technique de pointe. En effet, cela ne dispense pas d'une vérification terrain. On ne peut pas dessiner ce qu'il y a sur l'image LiDAR sans vérification terrain car l'image peut aussi avoir des défauts : dans le traitement du nuage de points d'une part mais aussi par rapport à certains éléments pour lesquels on ne peut dire s'ils sont naturels, culturels ou bien artificiels.

Néanmoins, cette image LiDAR permet d'optimiser au mieux les recherches terrains. Elle représente un véritable outil d'aide aux relevés.

Elle permet tout d'abord de se trouver les formes beaucoup plus facilement qu'avec les méthodes traditionnelles avec lesquels on n'avait aucune connaissance avant d'aller sur le terrain. Elles permettent aussi de se repérer beaucoup plus facilement sur le terrain. Ensuite, grâce à l'analyse du raster, on va vérifier seulement les endroits qui semblent suspects où l'on pense trouver quelque chose (points d'explorations), on ne va pas au « hasard » à la recherche d'architectures. Cela permet donc d'être plus efficace sur le terrain et de cibler les endroits à visiter. On pourra donc relever une plus grande surface pour une période de temps donnée avec des résultats plus détaillés. Pour couvrir la totalité de la zone d'El Pilar (20 km<sup>2</sup>), il faudrait 300 jours (moins d'un an) alors qu'à Tikal, 4 années ont été nécessaires pour cartographier 16 km<sup>2</sup>.

Enfin, cela permet de faire des relevés tout en conservant la forêt, on n'est pas obligé de réaliser des brèches dans la forêt pour aller lever les monts. On utilise au mieux les chemins présents et on ouvre un chemin au milieu de la jungle seulement lorsque cela est vraiment nécessaire. En effet, lorsque les méthodes traditionnelles telles que « Pace & Compass » étaient mises en place des brèches de 2.5 m étaient ouvertes dans la jungle (Figure 34).



**Figure 34 : Brecha Anabela**  
Source : [elpilarprogram.blogspot.com](http://elpilarprogram.blogspot.com)

L'utilisation du GPS apporte aussi une aide supplémentaire pour pouvoir dessiner car les points – même s'ils ne sont pas toujours précis – constituent un élément de plus pour aider à représenter au mieux les architectures et leurs emplacements.

Le but de la mise en place du nouveau protocole terrain est donc de trouver un compromis entre les anciennes méthodes et les nouvelles technologies. Il faut essayer de prendre le meilleur de chaque côté pour obtenir un résultat optimum quant à la réalisation de la carte.

## Conclusion

L'objectif initial de ce mémoire était de mettre en place un protocole terrain afin de détecter les sites archéologiques Mayas et les cartographier à l'aide d'une image LiDAR sur le site d'EL Pilar (Belize, Guatemala). Pour cela, nous avons développé un protocole pour visant à optimiser chaque étape du processus : Intégration des données dans le GPS, navigation sur le terrain à l'aide des GPS, collecte des données avec plusieurs unités, déchargement, traitement, concaténation et gestion des données ainsi que leur intégration dans le SIG.

La mise en place, l'utilisation et la validation de ce protocole ainsi que la comparaison des résultats avec les méthodes de relevés traditionnels nous ont permis de montrer la puissance de l'image LiDAR en tant qu'outil pour la cartographie des anciens sites Maya. Même si cette image n'est pas une solution magique pour la détection et les relevés des sites, elle permet d'optimiser la phase de relevés en fournissant des objectifs précis des endroits à visiter (établissement d'un ordre de priorité). Ce nouveau protocole possède de nombreux avantages : rapidité, efficacité, conservation de la forêt tout en essayant de produire une carte la plus correcte possible. L'utilisation de l'image LiDAR, de points GPS et de croquis permet d'assurer l'exactitude de la carte. C'est une méthode moderne, mais il ne faut pas y croire aveuglément et les vérifications terrain sont toujours nécessaires.

Même si la mise en place de ce protocole a été une réussite, il peut encore être amélioré. Pour pouvoir encore mieux se repérer sur le terrain, il serait bien d'ajouter en fond de carte sur le GPS la carte réalisée sous ArcGIS. De cette manière on pourrait toujours savoir si l'endroit où l'on se trouve a été cartographié et si c'est le cas est-ce que la représentation est correcte. Parfois, on se rend sur un site que l'on a ciblé et sur le chemin on en rencontres d'autres : si on n'a pas emmené des impressions de tous ces endroits on ne sait pas forcément si les formes culturelles rencontrées ont déjà été cartographiées ou non. Ce serait donc un outil de plus qui permettrait de perfectionner. De plus, si des critères spécifiques pour classer par ordre de priorité les sites à aller visiter.

Ce TFE m'a permis de réaliser un travail de recherche. Il a été très formateur car c'est la première expérience aussi longue dans un environnement très différent. Cela a d'abord une expérience humaine très riche grâce à la rencontre avec les Mayas qui ont toujours quelque chose à nous apprendre sur la nature, la jungle. Ils disent « If you didn't learn something today, you died yesterday ».

Malgré certaines difficultés rencontrées (chaleur, jungle, insectes, promiscuité) ce fut un stage très enrichissant pour le futur : il m'a permis de voir mes capacités d'adaptation à un nouvel environnement et à une nouvelle langue. C'est une expérience qui a été très formatrice aussi bien sur le plan professionnel que personnel.

## 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, 60 p.

GIRARDIN Anne. *The El Pilar archeological mapping project : a geographic information system objective.*

Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT, Le Mans : ESGT, 1999.

MORDANT Gabriel. *Seuils de détection des anciens sites d'architecture Maya basé sur l'imagerie LiDAR : identification des sites sous la canopée.*

Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT, Le Mans : ESGT, 2014.

### Articles de recherche

BULLARD William Jr. *Maya settlement pattern in northeastern Petén, Guatemala.* American antiquity, vol. 25, no 3, 1960.

CAMPBELL et al. *The feral forest of the eastern Petén.* 2006

Disponible sur :

<http://www.marc.ucsb.edu/sites/www.marc.ucsb.edu/files/pdfs/ResearchDevelopment/06%20Campbell%20AF%20Feral%20Forests.pdf>

CARR, R. F. and J. E. HAZARD. *Tikal Report 11: Maps of the Ruins of Tikal, El Peten, Guatemala.* 1961, Philadelphia, University Museum University of Pennsylvania.

CHASE Arlen F., CHASE Diane Z., FISHER Christopher T., LEISZ Stephen J. & WEISHAMPEL John F.. *Geospatial Revolution and Remote Sensing LiDAR in Mesoamerican Archaeology.* PNAS, 2012, vol. 109, no. 32, pp. 12916-12921.

Disponible sur : <http://www.pnas.org/content/109/32/12916.full>.

FORD A.. *Dominant Plants of the Maya Forest and Gardens of El Pilar: Implications for Paleoenvironmental Reconstructions.* Journal of Ethnobiology, 2008, 28(2): 179-199.

FORD & NIGH. *The Maya and their forest, yesterday, today and tomorrow.* Left coast press. À paraître, 2015.

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, 2013, vol. 77, pp. 21-30.

Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271613000026>

## Rapport de terrain

NORMARK P. Johan. *Settlement Survey and Mapping*. 10April, 2001.

## Sites WEB :

JOYCE Rosemary. *Good Science, big hype, bad archeology*. July 2012.

Disponible sur : <http://blogs.berkeley.edu/2012/06/07/good-science-big-hype-bad-archaeology/>  
(Consulté le 3 mai 2014)

ESP. Exploring Solutions Past – The Maya Forest Alliance.

Disponible sur : [www.espmaya.org](http://www.espmaya.org) . (Consulté le 12 février 2014)

ESP. The El Pilar Forest Garden Network.

Disponible sur : [www.mayaforestgardeners.org](http://www.mayaforestgardeners.org) . (Consulté le 12 février 2014)

ISBER/MesoAmerican Research Center. Meso American Research Center.

Disponible sur : [www.marc.ucsb.edu](http://www.marc.ucsb.edu). (Consulté le 12 février 2014)

GPS Garmin® 62s, User guide.

Disponible sur:

<https://buy.garmin.com/fr-FR/FR/sur-les-sentiers/gps-portables/gpsmap-62s/prod63801.html>  
[http://static.garmincdn.com/pumac/GPSMAP62\\_OM\\_FR.pdf](http://static.garmincdn.com/pumac/GPSMAP62_OM_FR.pdf)

ArcGIS® Help.

Disponible sur : <http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html#//00qn0000001p000000>

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Carte de situation de la réserve d'El Pilar .....  | 8  |
| Figure 2 : Carte de situation de Tikal .....  | 8  |
| Figure 3 : Schéma d'un relevé par cheminement .....   | 11 |
| Figure 4 : Tableau récapitulatif des méthodes de relevés utilisées en 2001 .....                        | 12 |
| Figure 5 : Goniographe .....  | 13 |
| Figure 6 : Image de gauche : Ensemble de 2 monts et place décalés grâce à l'image LiDAR .....           | 16 |
| Figure 7 : Exemple de point U .....   | 17 |
| Figure 8 : Grilles mises en place sur la réserve d'El Pilar .....                                       | 20 |
| Figure 9 : Exemple de point "Datum" et dessins associés .....   | 21 |
| Figure 10 : Carte de Tikal (Guatemala) .....  | 22 |
| Figure 11 : Extrait de la carte d'El Pilar .....  | 22 |
| Figure 12 : Représentation des monts sur le site de Tikal .....   | 23 |
| Figure 13 : Exemple de dessin.....  | 24 |
| Figure 14 : Diagramme des différentes étapes à mettre en place .....                                    | 25 |
| Figure 15 : Architecture des dossiers GPS .....   | 26 |
| Figure 16 : Architecture de dossiers créés pour le transfert des fichiers .....                         | 27 |
| Figure 17 : Transfert SIG - GPS .....   | 28 |
| Figure 18 : Exemple de points GPS qui ont permis de dessiner .....                                      | 31 |
| Figure 19 : Phase terrain de collection des données .....   | 32 |
| Figure 20 : Déchargement des données : GPS au SIG.....  | 33 |
| Figure 21 : Diagramme récapitulatif du processus de gestion des données.....                            | 34 |
| Figure 22 : Visualisation des points GPS .....  | 35 |
| Figure 23 : Croquis réalisé sur le terrain .....  | 35 |
| Figure 24 : Ensemble des quadrants relevés en 2001 et en 2014 .....                                     | 36 |
| Figure 25 : Décalage entre les relevés de 2001 et 2014 .....  | 39 |
| Figure 26 : Décalage entre les relevés de 2001 et de 2014 .....   | 40 |
| Figure 27 : Graphique représentant la quantité d'arbres présents selon la présence ou non de site ..... | 42 |
| Figure 28 : Graphique représentant la quantité d'acajou et de Cicle selon l'habitat .....               | 43 |
| Figure 29 : Proportion de monts acceptés ou rejetés selon la densité de la canopée .....                | 43 |
| Figure 30 : Proportion de monts acceptés ou rejetés selon la densité de la sous-végétation .....        | 44 |
| Figure 31 : Proportion de carrières acceptés ou rejetés selon la topographie .....                      | 44 |
| Figure 33 : Proportion de monts acceptés ou rejetés selon la topographie .....                          | 44 |
| Figure 32 : Proportion de dépressions acceptés ou rejetés selon la topographie .....                    | 44 |
| Figure 34 : Brecha Anabela .....  | 45 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Symbolologie des différents éléments d'architecture .....         | 24 |
| Tableau 2 : Réception des satellites.....                                     | 28 |
| Tableau 3 : Comparaison des différentes méthodes de relevés .....             | 37 |
| Tableau 4 : Comparaison du nombre de monts entre 2001 et 2014.....            | 39 |
| Tableau 5 : Tableau récapitulatif du nombre de monts et de leur densité ..... | 41 |

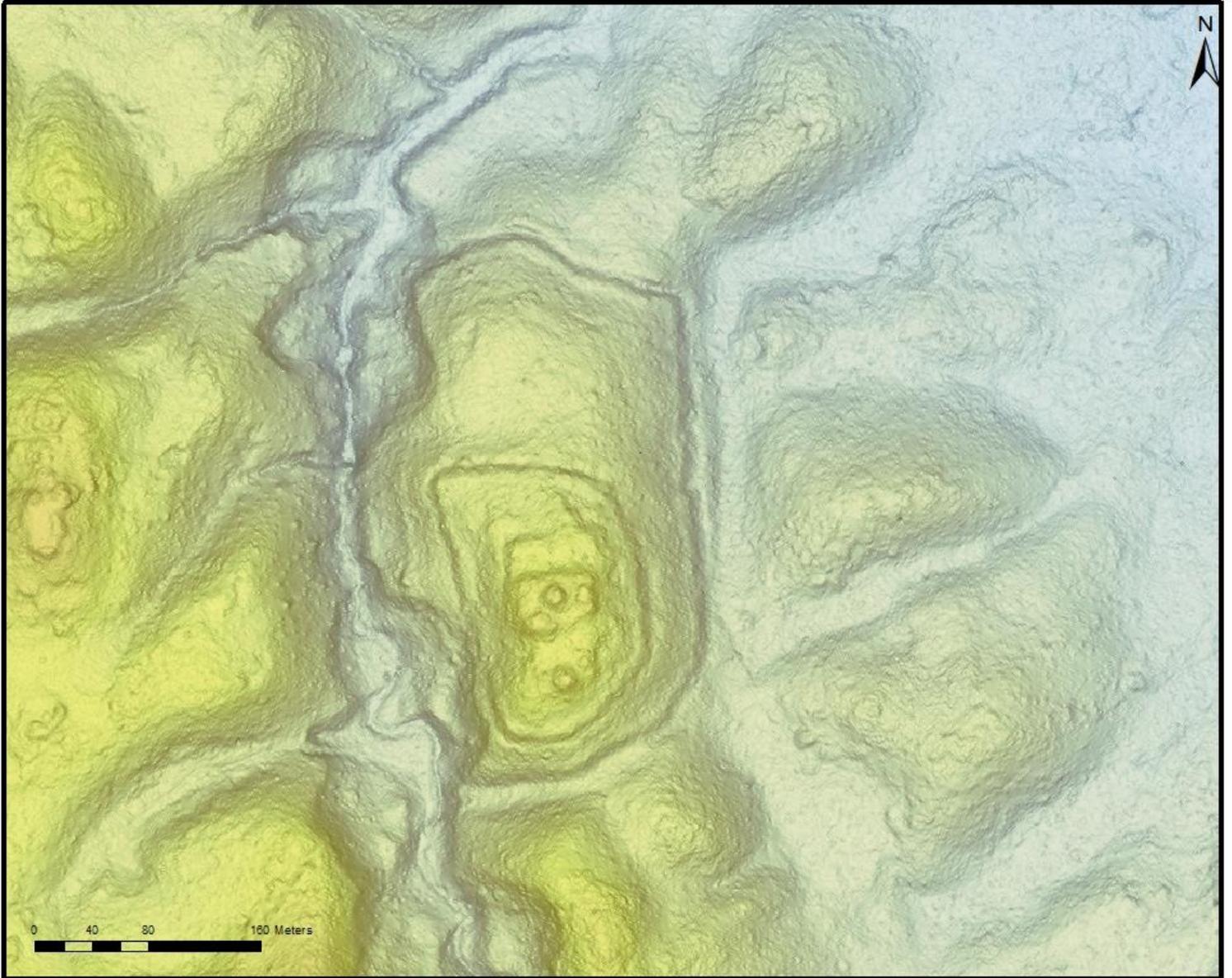
## Table des annexes

|  |    |
|--|----|
| Annexe 1 : Image Lidar du site d'El Pilar .....  | 52 |
| Annexe 2 : Image LiDAR de la citadelle.....  | 53 |
| Annexe 3 : Détection d'éléments de jointure entre les deux sites majeurs d'El Pilar .....                                  | 54 |
| Annexe 4 : Fiches de relevés type lors d'un cheminement .....  | 55 |
| Annexe 5 : Raster de visualisation - appelé Bonemap – issu du nuage de points LiDAR sur la réserve d'El Pilar (2013) ..... | 58 |
| Annexe 6 : Exemple de feuille de terrain utilisée en 2013 .....  | 59 |
| Annexe 7 : Notice de la création du fichier DBF .....  | 60 |
| Annexe 8 : Notice de la création du fichier GPX .....  | 62 |
| Annexe 9 : Exemple de carte utilisée .....   | 63 |
| Annexe 10 : Feuille de suivi journalier .....  | 64 |
| Annexe 11 : Feuille de contrôle des tâches journalières .....  | 65 |
| Annexe 12 : Feuille descriptive des éléments relevés .....   | 66 |
| Annexe 13 : Notice pour la navigation dans le GPS .....  | 68 |
| Annexe 14 : Notice pour l'enregistrement des points dans le GPS .....  | 69 |
| Annexe 15 : Notice pour l'intégration des données GPS dans le SIG .....  | 70 |
| Annexe 16 : Traitement, concaténation et gestion des données .....   | 72 |

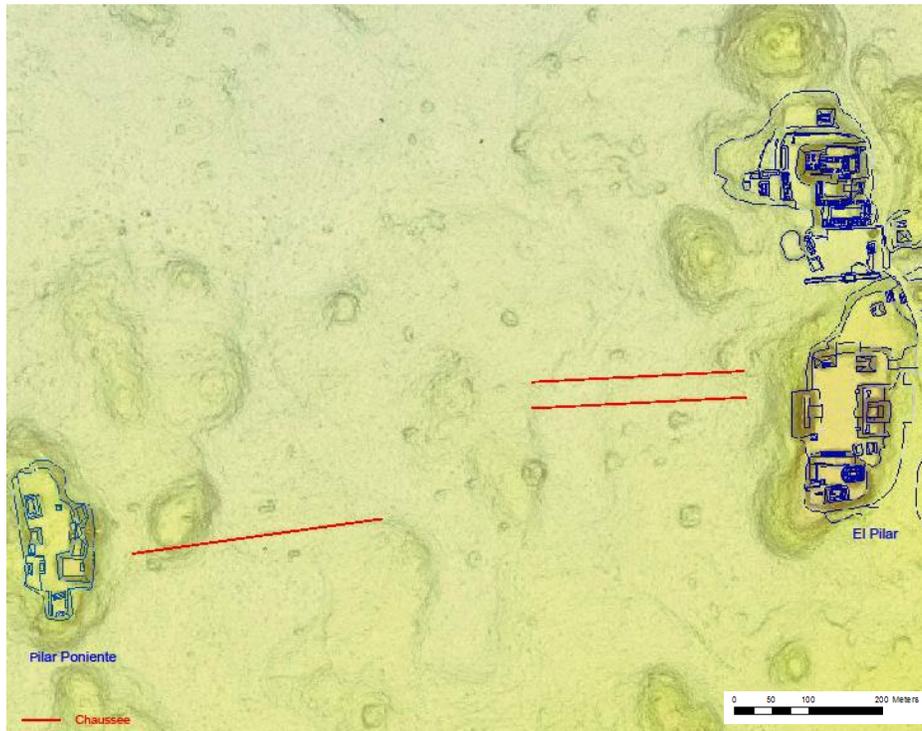
**Annexe 1 :**  
**Image Lidar du site d'El Pilar (Pingle, 2013)**



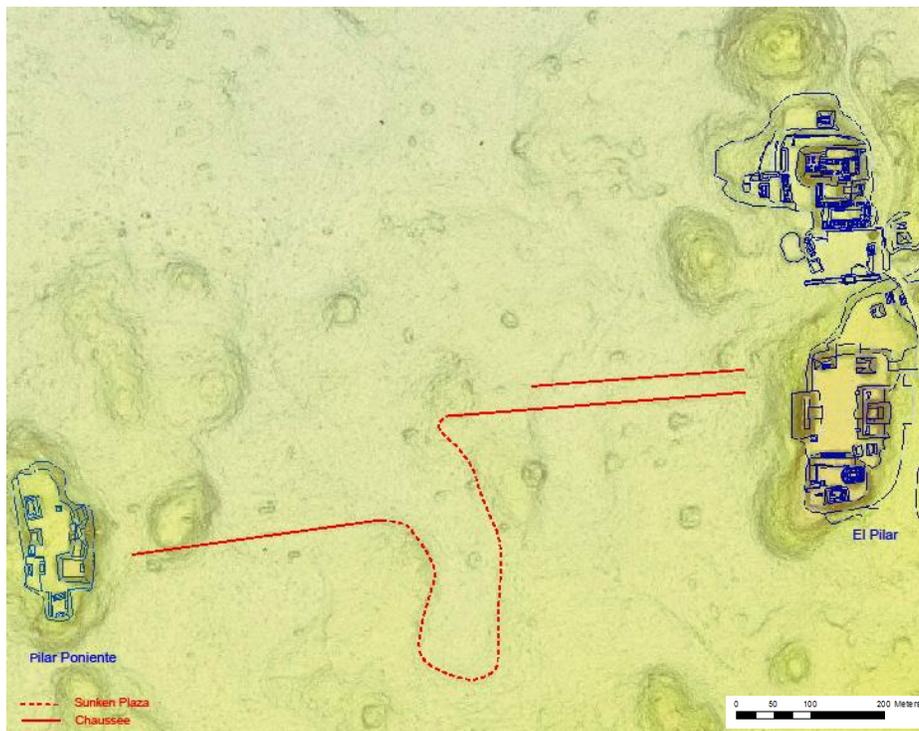
**Annexe 2 : Image LiDAR de la citadelle (Pingle, 2013)**



### Annexe 3 : Détection d'éléments de jointure entre les deux sites majeurs d'El Pilar



Éléments connus avant l'obtention de l'image LiDAR



Découverte de la « Sunken Plaza » qui relie les deux chaussées (MARC, 2013)

# Annexe 4 : Fiches de relevés type lors d'un cheminement

Feuille de suivi journalier utilisée en 2001 :

## B.R.A.S.S. DAILY SURVEY NOTES

Date: 13 Apr 2001 Pg. 1 of 1  
 Crew chief: Johan Domask Baseline: AZ  
 Crew: Erin C. Paul F. Tomasz P. Nick G. Alejandro P. Jason M. Jerry E.

Indicate baseline interval direction of walk and crew member's initials for each survey trail.

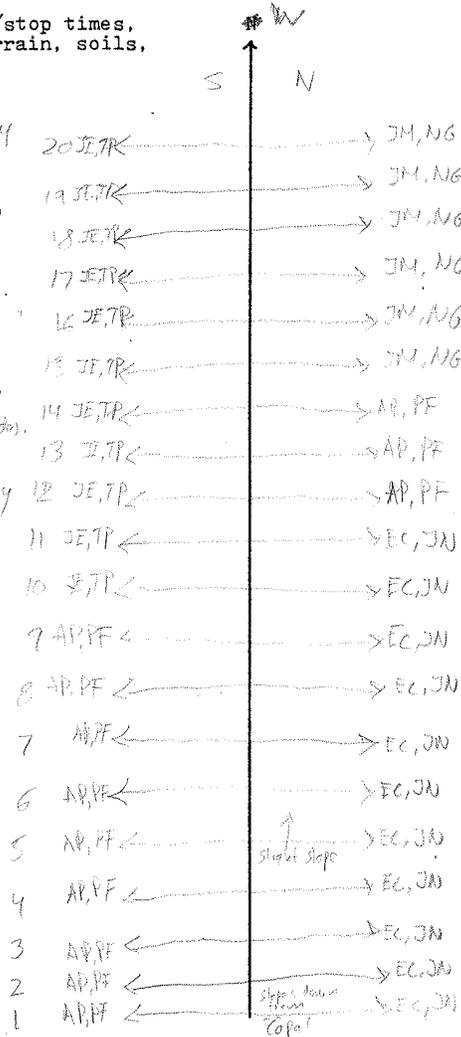
NOTES: (please include work start/stop times, general notes on vegetation, terrain, soils, etc.)

8<sup>15</sup> Erin and I showed the crew how to use the survey tools in picado AZ-4N. After that I sent Tom and Jerry to the south-western end of the tract to walk their way back to the starting point. Jason and Nick were sent to the North-western end of the tract, Paul and Alejandro started in the south-eastern end and me and Erin started in the north-eastern end.

11<sup>15</sup> we went for lunch.

12<sup>15</sup> Back at the picado, I let Jerry, Tomasz, Paul and Alejandro finish up the remaining picados. Erin, Jason, Nick and I went to AZ-20N to start the mapping process. Tomasz and Jerry later joined us while Paul and Alejandro got cover leaves for the boat on Saturday.

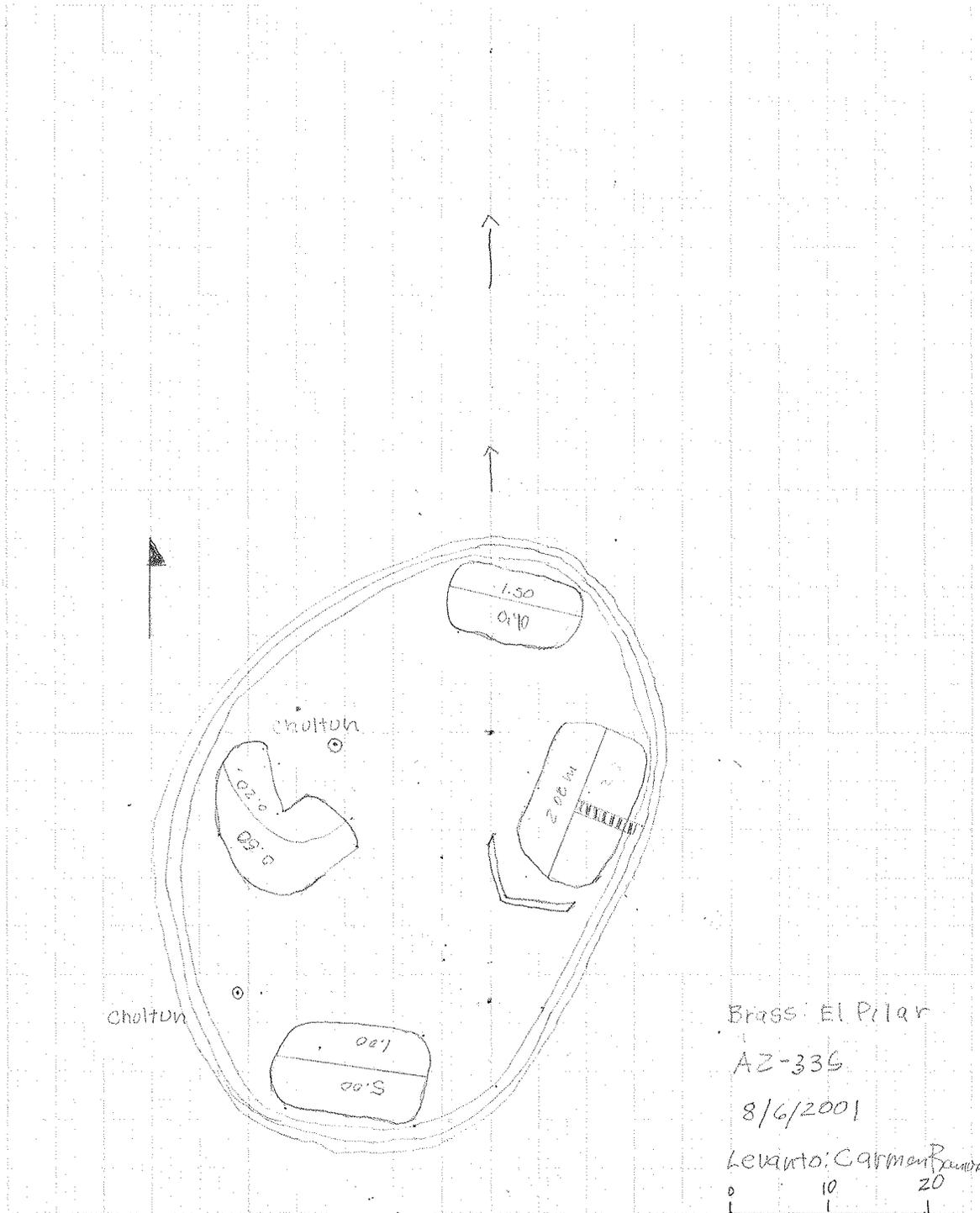
There are several cover lines, but less thick forest (esp. from the area close to Copal). The coverway is the main feature in the northern section and several large plaza groups and aguadas have been found.



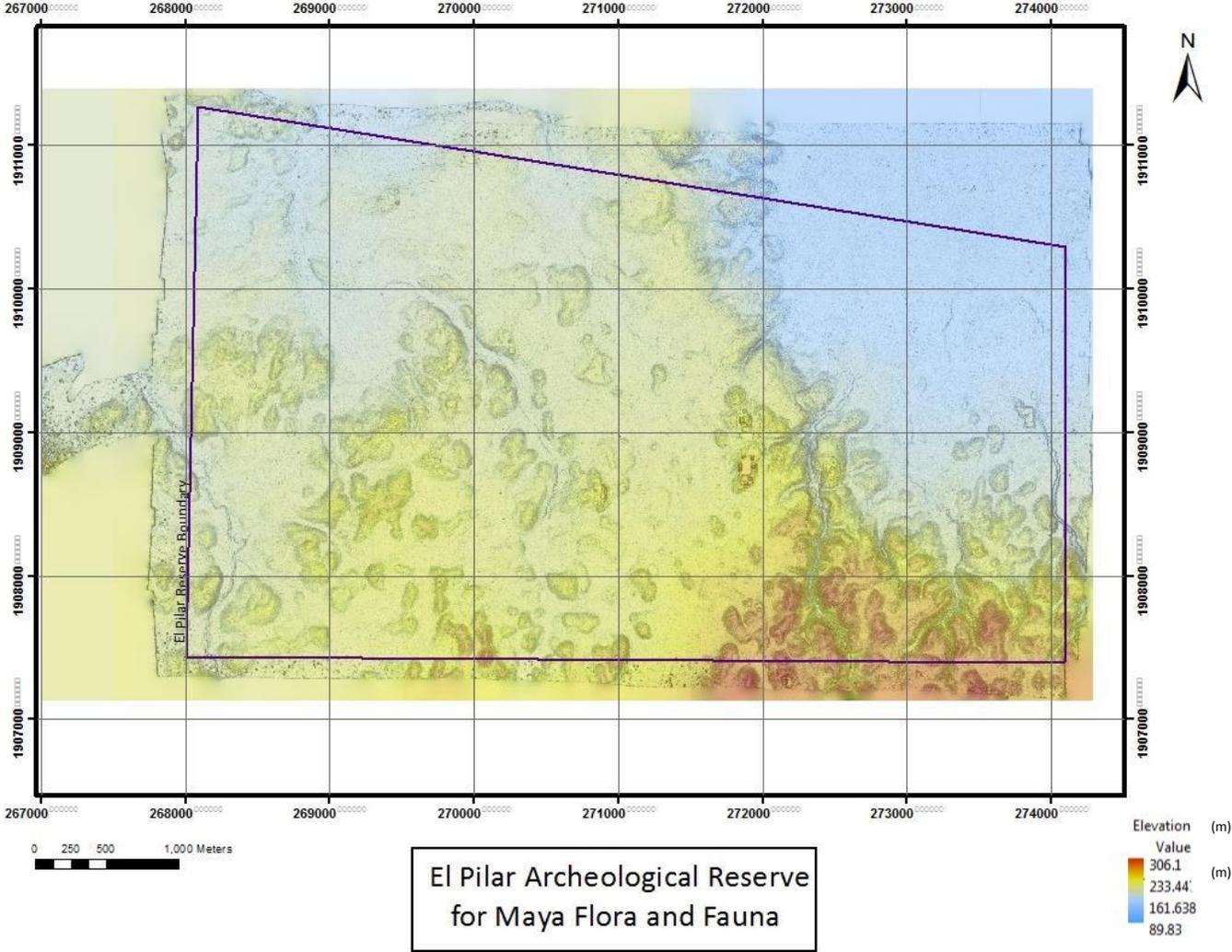


Feuille de relevé spécifique d'un site :

• AZ-33



**Annexe 5 : Raster de visualisation - appelé Bonemap – issu du nuage de points LiDAR sur la réserve d’El Pilar (2013)**



## Annexe 6 : Exemple de feuille de terrain utilisée en 2013

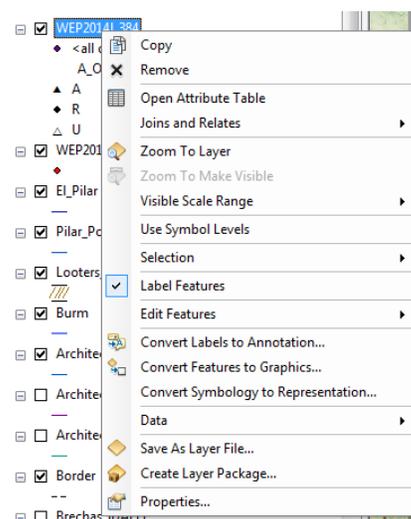
Chief: \_\_\_\_\_  
 Crew: \_\_\_\_\_

Field check

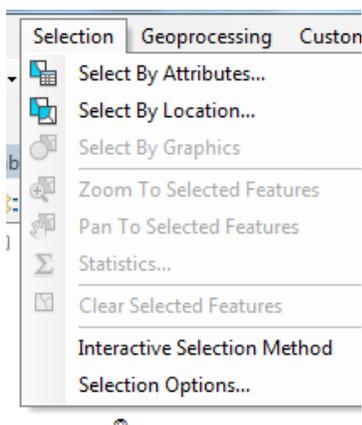
| Site              | Northing          | GIS Map   | Paper map | Description | A<br>or<br>R | Végétation                   | Coverage | Terrain | Understory | Date | Dimensions<br>L W hmin<br>hmax depth | GPS1<br>EN | GPS2<br>EN | GPS3<br>EN |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|------------------------------|----------|---------|------------|------|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| A2-22.,<br>A2-24S | 271290<br>1908483 | VI<br>/F3 |           |             | A            | SC/HG/CZ/SB/FW/<br>GB/GL/ESC | M        | F       |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |
|                   |                   |           |           |             |              |                              |          |         |            |      |                                      |            |            |            |

## Annexe 7 : Notice de la création du fichier DBF

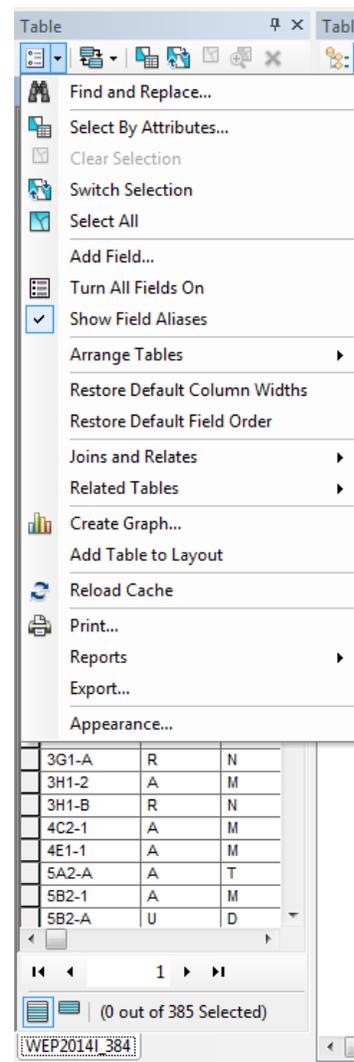
- Ouvrir la carte sur Arcmap : double-clique sur le fichier
- Sélection des points que l'on souhaite intégrer au GPS
- Ouverture de la table attributaire : clic droit sur la table  
-> Open Attribute Table



- La table d'attribut s'ouvre : sélectionner l'onglet "table options" et "Select All" si on souhaite avoir toute la table
  - o Si on ne souhaite que certains éléments il faut faire une requête attributaire : Selection -> Select by attributes

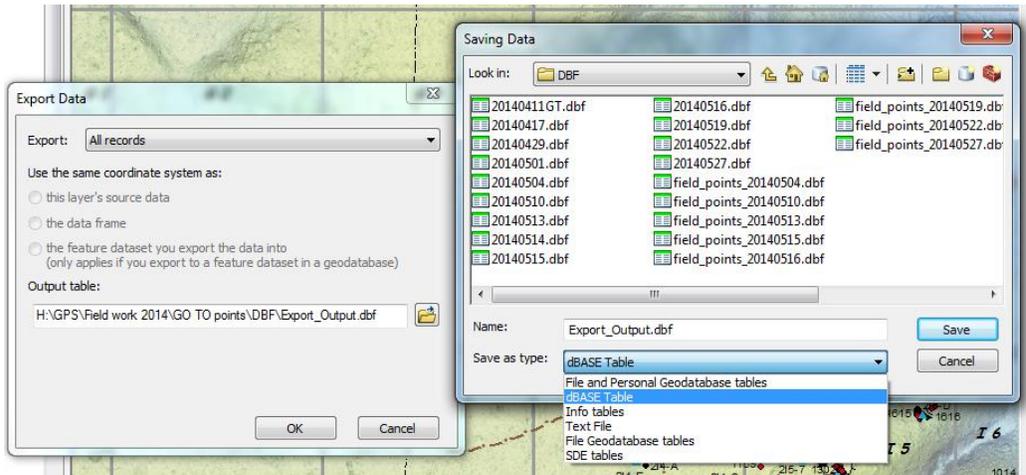


- Une fois que la sélection voulue est réalisée on sélectionne – toujours dans l'onglet table options – "Export".

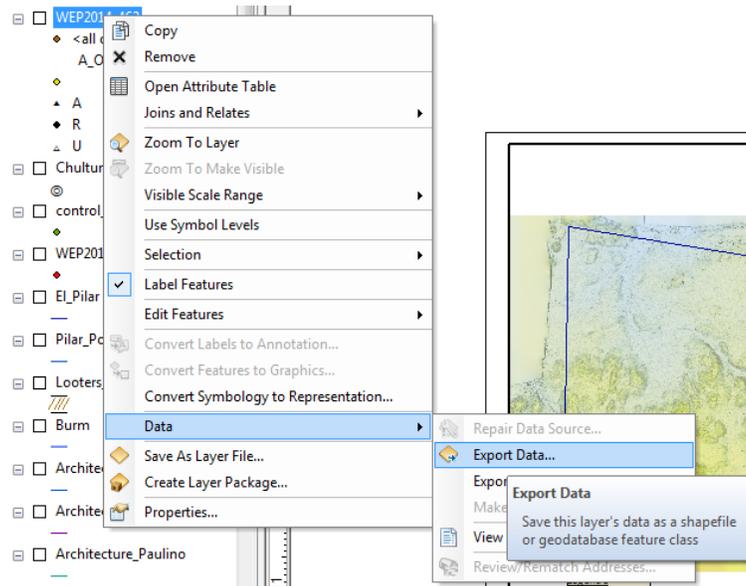


- On enregistre alors la sélection au format .dbf (dBase table) dans le dossier DBF (voir architecture des fichiers). On choisit un nom qui convient et qui contient la date de création du fichier. (Exemple : YYYYMMDD.dbf)

Le fichier DBF est créé.



- Si on souhaite seulement exporter une couche au format Shapefile : clic droit sur la couche -> Data -> Export Data et on choisit comme précédemment un nom adapté.



## Annexe 8 : Notice de la création du fichier GPX

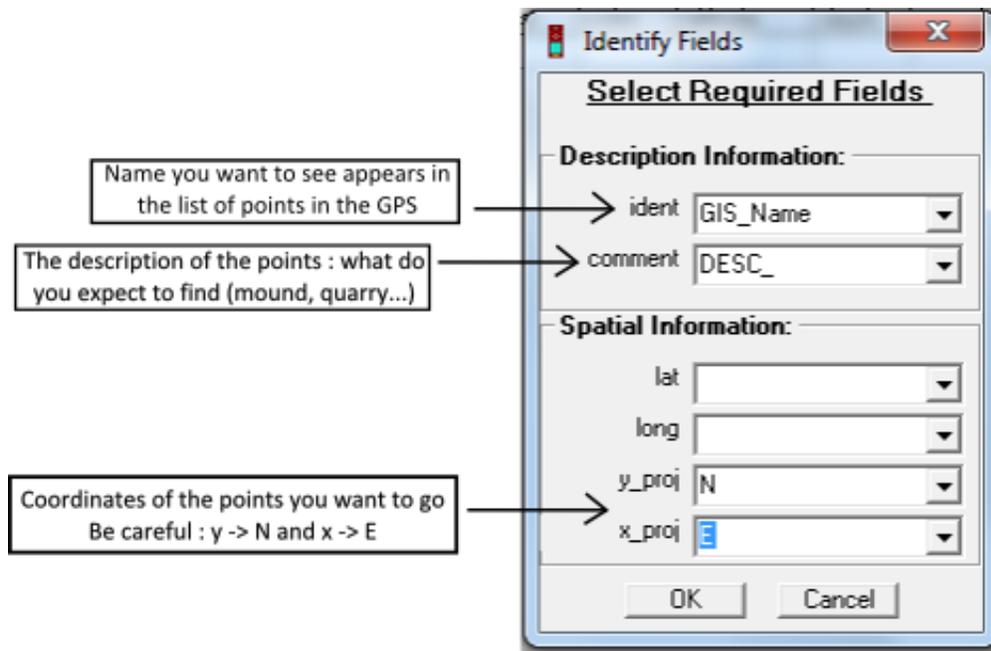
Il faut alors passer par le logiciel DNR Garmin



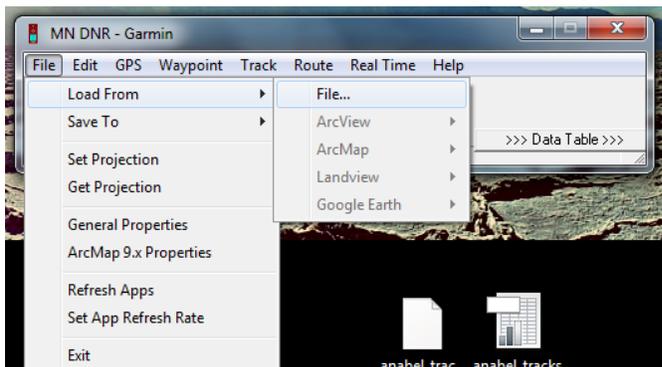
L'interface s'ouvre. Importer le fichier DBF juste créé : File -> Load from -> File On ouvre donc notre fichier .dbf : YYYYMMDD.dbf ou .shp enregistré précédemment.

Une boîte de dialogue apparaît dans laquelle il faut renseigner certains champs. Dans chaque champ requis, il nous est proposé l'ensemble des champs présents dans la table des points que l'on a exportée.

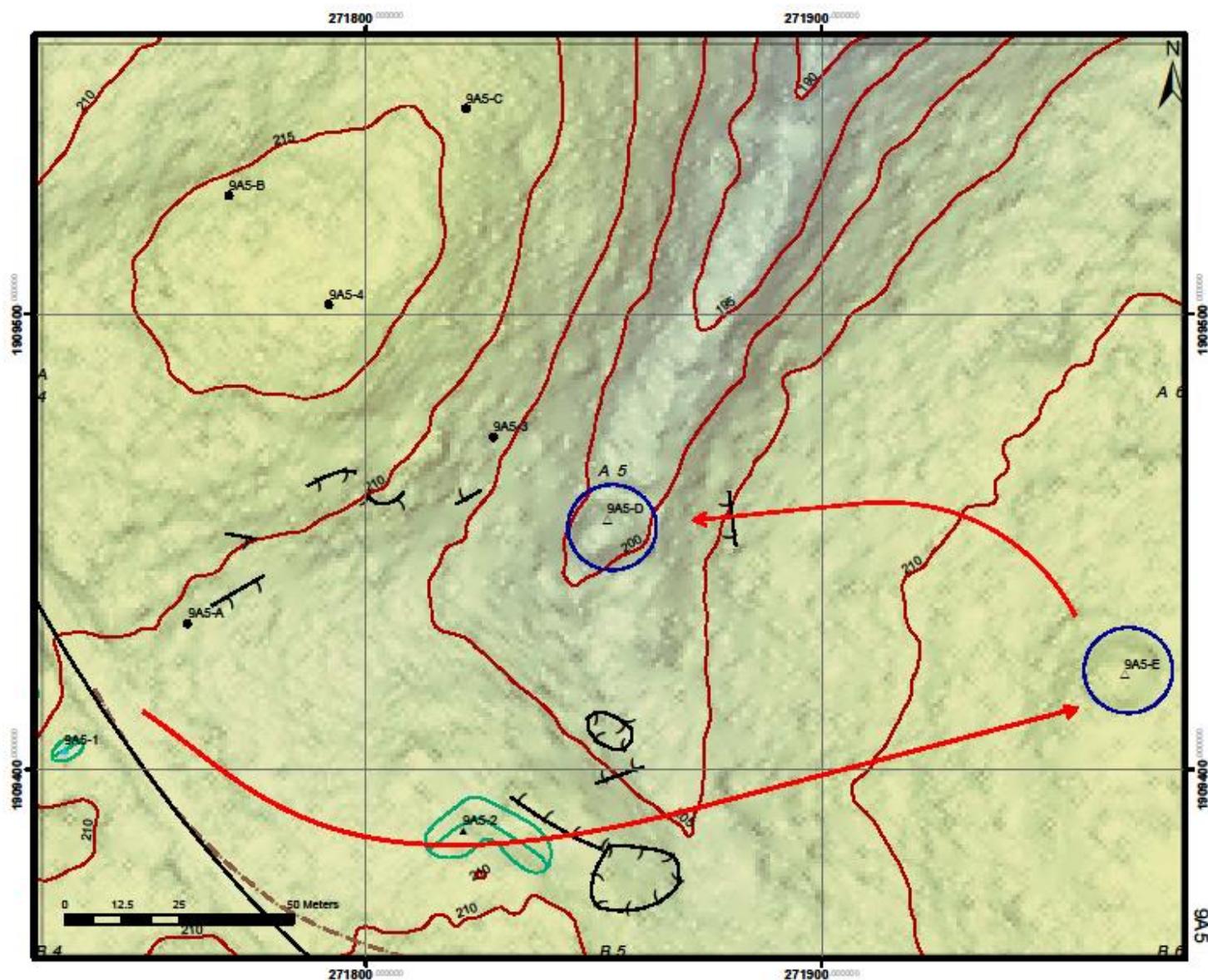
Il suffit de remplir les champs adaptés.



Le sauvegarder en fichier gpx dans le fichier GPX (voir architecture des fichiers) avec le même nom que le fichier DBF. On sauvegarde alors en format .gpx : YYYYMMDD.gpx

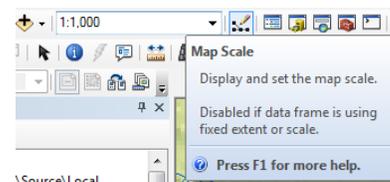


## Annexe 9 : Exemple de carte utilisée



Les objectifs de ce quadrant sont les points 9A5-E et 9A5-D entourés en bleu. On schématise le chemin emprunté entre les différents points visités sur la carte par les flèches rouges.

Pour réaliser ces cartes sur ArcGIS, on choisit dans un premier temps l'échelle 1 :1000 :



On exporte alors la carte en PDF : File -> Export map





## Annexe 12 : Feuille descriptive des éléments relevés

**LiDAR Field Form**
Date :

Chief \_\_\_\_\_

Crew \_\_\_\_\_ 2

Flag  3

Segment 9 1

Easting 271975

Northing 1909415

Destination A5-E

GPS # 3 & 5

4

**Sketch :** Datum, High Point , Perimeter Points, N arrow, hieghts

Not to scale

Canopy M    Understory M    Terrain F

Vegetation

20 Dominant trees 5

---

Other trees

Mapping points

| Description    | Points numbers | No. of Points | Description | Points numbers | No. of Points |
|----------------|----------------|---------------|-------------|----------------|---------------|
| HP= High Point | 9A5-E          |               |             |                |               |
| GPS #3         | ① 1652 -> 1666 |               |             |                |               |
| GPS #3         | ② 1667 -> 1675 |               |             |                |               |
| GPS #3         | ③ 1676 -> 1687 |               |             |                |               |
| GPS #5         | ④ 3145 -> 3155 |               |             |                |               |
| GPS #5         | ⑤ 3156 -> 3170 |               |             |                |               |

Total mapping points : \_\_\_\_\_

Notes

Final Check

Remplissage de la feuille :

- 1) Inscrire l'identifiant du point
  - Segment : numéro de la grille (1 à 9)
  - Destination : l'identifiant du point dans les subdivisions des grilles
- 2) Les coordonnées UTM du point : Easting et Northing
- 3) La présence d'un drapeau sur le site : on accroche un ruban sur lequel on indique le numéro du site ainsi que la date.
- 4) Les caractéristiques du terrain et de la végétation :
  - La densité de la canopée : Ouverte (O), Medium (M) ou Dense (D)
  - La densité de la sous-végétation : Ouverte (O), Medium (M) ou Dense (D)
  - La topographie du terrain : Plat (F), Pente (S) ou Sommet de colline (T)
- 5) Le cadre concernant la végétation :
  - Dans un premier temps on note tous les arbres qui font partie des 20 arbres dominants de la forêt Maya
  - Ensuite on inscrit tous les autres arbres présents.
- 6) On réalise un croquis du site avec tous les éléments qu'il comporte. Pour chaque élément on associe un numéro pour lequel on va répertorier les points GPS qui serviront à le dessiner.

## **Annexe 13 : Notice pour la navigation dans le GPS**

On cherche à aller vers le premier point : par exemple 9A5-E. On effectue une recherche dans le GPS.

- Double-clique sur Menu
- Waypoints manager
- Menu -> Spell search
- Taper le nom
- Go
- Presser Page jusqu'à tomber sur la page Compass

S'orienter avec la boussole du GPS pour rejoindre le point. Si on remarque que la boussole ne fonctionne pas correctement, il faut la calibrer de nouveau :

- Double-clique sur Menu
- Setup
- Heading
- Calibrate Compass
- Suivre les instructions

## **Annexe 14 : Notice pour l'enregistrement des points dans le GPS**

On enregistre les points de différentes façons pour le point qui situe le site (point Datum) :

- Soit on repositionne le point :
  - Double clique Menu
  - Waypoint Manager
  - Menu -> Spell search
  - Chercher le point à repositionner
  - Menu -> Reposition here
  
- Soit on enregistre un nouveau point :
  - Mark
  - Entrer le nouveau nom du point
  - Enregistrer

Un autre type de points a besoin d'être enregistré : les points de dessins :

- On enregistre le point :
  - Mark
  - Done

## Annexe 15 : Notice pour l'intégration des données GPS dans le SIG

À la fin de la journée terrain, on obtient deux fichiers GPX détaillés précédemment. L'objectif est donc d'intégrer les points relevés sur le terrain dans le SIG de la forêt Maya.

### Sauvegarde des fichiers bruts obtenus la journée

Pour avoir des archives de tout ce qui a été fait et ne pas perdre d'informations, on enregistre les fichiers GPX de la journée dans les dossiers suivants :

- Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\RAW\Waypoints
- Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\RAW\Tracks
- Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\RAW\Updated

Au maximum, les fichiers à télécharger sont les suivants :

- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS1.gpx
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS2.gpx
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS3.gpx
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS5.gpx
- YYYYMMDD\_Updated.gpx
- Tracks\_DD-Month-YY.gpx

### Conversion des fichiers GPX en fichiers SHP

On utilise de nouveau le logiciel DNR Garmin qui permet le type de format de fichiers qui nous intéressent (.shp et .gpx). On convertit tous les fichiers cités précédemment au format SHP. On les enregistre dans le dossier :

- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS1.shp
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS2.shp
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS3.shp
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS5.shp

Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\SHP\  
Waypoints

- YYYYMMDD\_Updated.shp →

Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\SHP\  
Updated\_GTpoints points

→ Tracks\_DD-Month-YY.shp →

Field\_work\_2014\Downloading\_from\_the\_GPS\SHP\  
Tracks

Lors du transfert DNR Garmin GPX → SHP souvent, apparaît le message d'erreur suivant qui empêche la conversion du fichier:

Error 5 : Invalid procedure call or argument

Il faut changer la zone horaire dans les propriétés générales : File->General Properties->Units->Set Time Zone et choisir la zone adaptée.

Il faut répéter cette manipulation avant la conversion de chaque fichier.

### Géoréférencement des fichiers shapefile

Ouvrir ArcCatalog. Aller dans les propriétés des shapefile dans l'onglet « XY Coordinates System ». Il faut alors choisir : Projected Coordinate System\UTM\WGS1984\WGS1984 UTM Zone 16N.

Les fichiers sont maintenant prêts pour être intégrés dans la plateforme SIG de la forêt Maya.

### Intégration des données dans le SIG

On peut alors importer toutes les couches dans ArcMap. On peut récapituler ce que contient chaque fichier.

→ Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS1.shp  
→ Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS2.shp  
→ Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS3.shp  
→ Waypoints\_DD-Month-YY\_GPS5.shp

- Mapping points  
- New « Datum »

→ YYYYMMDD\_Updated.shp : Les GO TO points mis-à-jour ainsi que tous les autres qui n'ont pas changés.

→ Tracks\_DD-Month-YY.shp : Le cheminement effectué la journée.

## Annexe 16 : Traitement, concaténation et gestion des données

### Traitement des points

Dans le SIG, trois tables de base sont présentes :

- WEP\_2014 qui contient tous les points déjà existants ;
- Mapping qui contient les points qui permettent de dessiner ;
- Tracks\_2014 qui contient toutes les routes empruntées sur le terrain.

Les points collectés chaque journée vont se trouver dans des fichiers bruts mentionnés précédemment :

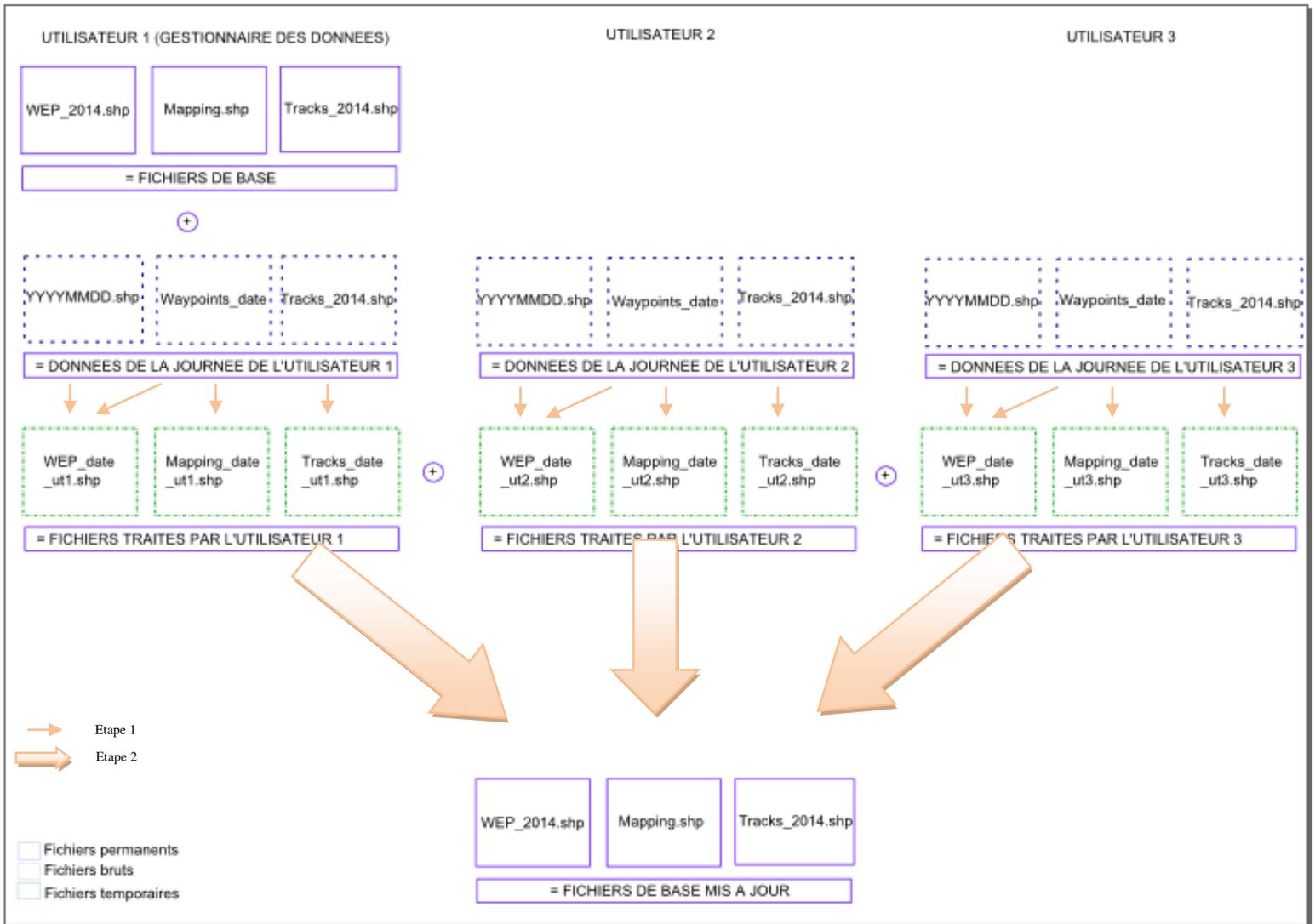
- Waypoints\_DD-Month-YY\_GPSX.shp
- YYYYMMDD\_Updated.shp.

Chaque utilisateur va traiter ses données de la journée pour créer trois nouveaux fichiers :

- WEP\_date\_utX contenant les points de données de la journée ;
- Mapping\_date\_utX contenant les points de dessins de la journée ;
- Tracks\_date\_utX contenant les chemins empruntés de la journée.

C'est ensuite la personne chargée de la gestion des données qui va rassembler toutes les informations dans les trois tables de base et qui va ainsi les mettre à jour régulièrement.

On peut résumer la situation par le diagramme suivant :



❖ Etape 1 : Passage des fichiers bruts aux fichiers traités par chaque utilisateur.

Chaque utilisateur va importer ses trois fichiers bruts :

- le fichier contenant l'ensemble des points existant et peut être mis à jour (YYYYMMDD.shp);
- le fichier contenant tous les points enregistrés pendant la journée (points de données et points de dessin) (Waypoints\_date) ;
- les chemins empruntés (Tracks\_date).



- Ensuite, cliquer – dans la barre d’outils d’édition – sur « Create Feature »

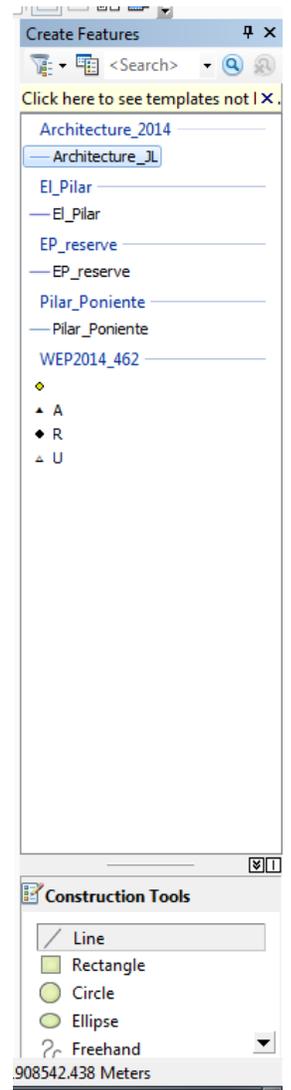
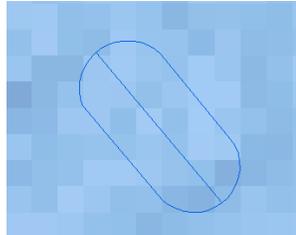


- La fenêtre de création s’ouvre :

On choisit la couche dans laquelle on veut dessiner. On sélectionne dans la partie « Construction Tool » le type de forme que l’on souhaite réaliser.

- Pour dessiner les monts, on choisit « Line » dans le calque « Architecture\_JL ». On les dessine toujours de la même manière : deux droites, deux arcs de cercles et une ligne transversale qui indique l’orientation du mont.

Exemple :



Comme pour les points, chaque utilisateur va réaliser ses propres dessins dans des tables qu’il appellera : Architecture\_utX, Plaza\_utX, depression\_utX...

**Mémoire d'Ingénieur E.S.G.T., Le Mans 2014**

---

**RÉSUMÉ**

Le LiDAR a créé une « révolution » dans le monde de l'archéologie Maya car les images ont révélé de nombreux éléments non découverts car les relevés dans cette partie du globe sont compliqués à cause de la végétation très dense. Cependant, ces images LiDAR ne sont pas magiques car premièrement il faut trouver une visualisation adéquate (Bonemap, 2013) et ensuite, elles ne dispensent pas de la phase de relevés terrain, elles permettent de la faciliter et de l'améliorer.

La mise en place d'un protocole qui associe des nouvelles technologies – LiDAR, GPS et SIG – et des méthodes classiques – feuilles terrain – permet d'optimiser les relevés terrain dans l'environnement de la forêt tropicale Maya ainsi que la gestion des données et d'améliorer le traitement des données qui s'ensuit. La validation sur le terrain a permis de prouver l'efficacité du protocole mis en place.

**Mots clés : LiDAR, Maya, forêt, conservation, protocole, GPS, SIG, méthodes de relevés.**

---

**SUMMARY**

LiDAR was seen as a revolution at the beginning in the world of Maya archeology as the images revealed many undiscovered elements because the surveys in this part of the globe are much more complicated due to the dense vegetation. However, LiDAR images are not a magic wand because first, an appropriate visualization needs to be made (Bonemap, 2013) and then, field surveys still need to be done. LiDAR images are just a tool to improve and facilitate the surveys.

The establishment of a protocol that combine new technologies \_ LiDAR, GPS and GIS – and classic methods – field logs – enable to optimize the field survey in the environment of the Maya rainforest as well as the data management and to improve the data processing that follows. The field validation proved how efficient the protocol was.

**Key words : LiDAR, Maya, forest, conservation, protocol, GPS, GIS, surveying methods.**