



HAL
open science

Histoire naturelle des phytolithes des basses-terres mayas : implication pour la reconstitution des Paléoenvironnements et des interactions sociétés-environnements

Marc Testé

► **To cite this version:**

Marc Testé. Histoire naturelle des phytolithes des basses-terres mayas : implication pour la reconstitution des Paléoenvironnements et des interactions sociétés-environnements. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2020. Français. NNT : 2020PA01H023 . tel-03097370

HAL Id: tel-03097370

<https://theses.hal.science/tel-03097370>

Submitted on 5 Jan 2021

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

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

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Ecole doctorale de Géographie de Paris (ED 434)
Laboratoire de Géographie Physique, Environnements Quaternaires et Actuels
UMR8591 CNRS

Thèse présentée par
Marc TESTÉ

Soutenue publiquement le 28 Février 2020 en vue de l'obtention du
DOCTORAT de l'UNIVERSITE DE PARIS 1 PANTHEON-SORBONNE
Spécialité : **Géographie physique, humaine, économique et régionale**

Histoire Naturelle des Phytolithes des Basses-Terres Mayas Implication pour la reconstitution des Paléoenvironnements et des interactions sociétés-environnements

Sous la direction de : **Nicole LIMONDIN-LOZOUET et Aline GARNIER**

Membres du Jury

Cyril CASTANET	McF. - Université Paris 8 – UMR8591 LGP	<u>Invité</u>
Didier GALOP	DR. - CNRS ; UMR5602 GÉODE	<u>Rapporteur</u>
Aline GARNIER	McF. - Univ. Paris Est Créteil ; UMR8591 LGP	<u>Directrice</u>
Franck LAVIGNE	Pr. - Université Paris 1 ; UMR8591 LGP	<u>Examineur</u>
Nicole LIMONDIN-LOZOUET	DR. - CNRS ; UMR8591 LGP	<u>Directrice</u>
Dominique MICHELET	DR. - CNRS ; UMR8096 ARCHAM	<u>Examineur</u>
Margareta TENGBERG	Pr. - MnHn ; UMR7209 AASPE	<u>Rapporteuse</u>
Luc VRYDAGHS	CR. - CReA Heritage ; VUB	<u>Examineur</u>

Résumé : Histoire Naturelle des Phytolithes des Basses-Terres Mayas, *Implication pour la reconstitution des Paléoenvironnements et des interactions sociétés-environnements*

Sous les latitudes tropicales, les phytolithes représentent un indicateur clé dans la reconstitution des paléoenvironnements. Pourtant, ils sont encore modestement utilisés dans les études sur les environnements passés des basses-terres mayas, et ce, en dépit du faible potentiel des autres bioindicateurs de la végétation. C'est dans ce contexte et au travers des riches archives sédimentaires du site archéologique de Naachtun et de ses alentours, que nous proposons une nouvelle approche permettant d'exploiter les avantages inhérents à ces microfossiles siliceux, pour l'étude des environnements passés. Situé à l'extrême nord du Guatemala dans la forêt subtropicale du Petén, le territoire de Naachtun fait l'objet de recherches archéologiques et géoarchéologiques depuis 2010. Par sa localisation géographique au sein des basses-terres et sa proximité aux grands centres politiques mayas, ce site représente un espace clé dans l'évaluation des interactions entre les sociétés mayas et l'environnement au cours des 4 derniers millénaires, problématique principale de ce travail doctoral. Afin d'y répondre, deux axes méthodologiques ont été privilégiés. Le premier axe concerne une démarche actualiste et a pour but de calibrer les assemblages modernes de phytolithes par rapport aux écosystèmes actuels, "naturels" et anthropiques, de Naachtun et de sa région. Le second axe, paléoenvironnemental, vise à utiliser les assemblages de phytolithes fossiles, enregistrés en contextes hors-site, dans les sédiments palustres de *bajo*, et intrasite, afin de proposer une reconstitution de l'histoire socioenvironnementale de Naachtun. Ce travail de thèse démontre le potentiel de ce nouvel outil pour l'approche des paléoenvironnements dans les basses-terres mayas mais il apporte aussi de nouvelles connaissances sur l'utilisation des zones humides par les populations mayas. Plus largement, ce travail s'insère dans la construction actuelle d'un imaginaire des sociétés mayas conscientes de leur environnement et adaptées à ses changements, contre-exemple de nos problématiques et crises modernes.

Abstract : Natural History of the Mayan Lowlands' Phytoliths, *Implications for the reconstruction of paleoenvironments and society-environment interactions*

In tropical latitudes, phytoliths represent an important indicator of the paleoenvironmental reconstructions. Yet, they are still modestly used in past environments studies of Mayan Lowlands, despite the low potential of other vegetation bioindicators. It is in this context, and through the rich sedimentary archives of the Naachtun archaeological site and its surroundings, that we propose a new approach to exploit the inherent advantages of these siliceous microfossils for the study of past environments. Located in the extreme north of Guatemala in the subtropical Petén forest, the territory of Naachtun has been the subject of archaeological and geoarchaeological research since 2010. With its geographical location in the middle of the major Mayan political centers, this site represents a crucial space in the evaluation of the interactions between Mayan societies and the environment over the last 4 millennia, the main issue of this doctoral dissertation. To answer this question, two methodological axes have been privileged. The first axis concerns an actualist approach and aims to calibrate modern phytolith assemblages about the current natural and anthropogenic ecosystems of Naachtun and its region. The second axis, palaeoenvironmental, aims to use fossil phytolith assemblages recorded in off-site contexts, in the bajo palustrine sediments, and intra-site, to propose a reconstruction of the socio-environmental history of Naachtun. This thesis research demonstrates the potential of this new tool for the approach of palaeoenvironments in the Mayan lowlands, but it also provides new knowledge on the use of wetlands by Mayan populations. More broadly, this work is part of the current construction of an imaginary of Mayan societies conscious of their environment and adapted to its changes, a counter-example to our modern problems and crises.

Abstract : Historia Natural de los Fitolitos de las Tierras Bajas Mayas, Implicaciones para la reconstrucción de Paleoambientes y de Interacciones Socio-Ambientales

En las latitudes tropicales, los fitolitos representan un indicador esencial en la reconstitución de paleoambientes. Sin embargo, todavía se utilizan modestamente en estudios de ambientes pasados en las Tierras Bajas Mayas, a pesar del bajo potencial de otros bioindicadores de vegetación. Es en este contexto, y a través de los ricos archivos sedimentarios del sitio arqueológico de Naachtun y sus alrededores, que proponemos un nuevo enfoque para explotar las ventajas inherentes de estos microfósiles silíceos para el estudio de los ambientes del pasado. Ubicado en el extremo norte de Guatemala en el bosque subtropical del Petén, el territorio de Naachtun ha sido objeto de investigaciones arqueológicas y geoarqueológicas desde 2010. Por su situación geográfica en las tierras bajas y su proximidad a los principales centros políticos mayas, este sitio representa un espacio crucial en la evaluación de las interacciones entre las sociedades mayas y el medio ambiente durante los últimos 4 milenios, el tema principal de este trabajo de doctorado. Para responder a esta pregunta se han privilegiado dos ejes metodológicos. El primer eje se refiere a un enfoque de actualismo y tiene como objetivo calibrar los ensamblajes de fitolitos modernos en relación con los actuales ecosistemas naturales y antropogénicos de Naachtun y su región. El segundo eje, paleoambiental, tiene como objetivo utilizar los ensamblajes de fitolitos fósiles registrados en contextos fuera del sitio, en los sedimentos palustres de bajo, y dentro del sitio, para proponer una reconstrucción de la historia socio-ambiental de Naachtun. Este trabajo de tesis demuestra el potencial de esta nueva herramienta para el abordaje de paleoambientes en las tierras bajas mayas, pero también aporta nuevos conocimientos sobre el uso de los humedales por parte de las poblaciones mayas. En términos más generales, este trabajo se inscribe en la construcción actual de un imaginario de sociedades mayas conscientes de su entorno y adaptadas a sus cambios, un contraejemplo a nuestros problemas y crisis actuales.

Voilà qui nous rappelle de façon salutaire que la majeure partie du monde et de sa population existait alors en dehors du périmètre des premiers États céréaliers. Ces derniers n'occupaient qu'une niche écologique étroite favorisant l'agriculture intensive. Au-delà de leur horizon, on trouvait une gamme d'activités que l'on pourrait désigner comme pratiques de subsistance "non-appropriable", dont les plus importantes étaient la chasse et la cueillette, la pêche et la collecte de ressources maritimes, l'horticulture, la culture itinérante et l'élevage spécialisé.

James C. Scott (2019)

Remerciements :

A Venir

Table des Matières :

Résumé	i
Remerciement	vii
Table des Matières	ix

Introduction Générale	001
-----------------------------	-----

PARTIE 1 - ‘ ‘BASSES-TERRES & PHYTOLITHES’ ’ CONTEXTUALISER LA RECHERCHE

Chapitre 1 - Les basses-terres tropicales mayas dans le temps et l’espace

I. Histoire naturelle de la péninsule du Yucatán et de ses forêts	013
II. Ère, Civilisation et Sociétés mayas	033
III. Forêts et agricultures dans les basses-terres centrales	045

Chapitre 2 - Les phytolithes pour l’étude des paysages néotropicaux

I. Histoire naturelle des phytolithes	063
II. Construction d’un référentiel phytolithique	093

PARTIE 2 - LES RÉFÉRENTIELS ACTUALISTES : NAACHTUN & UAXACTUN

Chapitre 3 - The phytoliths of Naachtun (Petén, Guatemala): Development of a modern reference for the characterization of plant communities in the Maya Tropical Lowlands	115
--	------------

Chapitre 4 - PAYSages Agraires d’aujourd’hui en terre MAYa

I. Communauté Forestière à Uaxactún : Entre Agricultures et Forêts	143
II. Sélection des parcelles et méthodologie d’étude	147
III. Botanique et pratiques agricoles contemporaines	152
IV. Résultats sur les bioindicateurs	160
V. Caractérisation des pratiques agricoles et contexte taphonomique	166

PARTIE 3 - ASSEMBLAGES FOSSILES & HISTOIRE SOCIO-ENVIRONNEMENTALE

Chapitre 5 - Reconstitution paléoécologique d’une zone humide dans les basses-terres mayas : étude croisée de bioindicateurs du bajo de Naachtun (Petén, Guatemala)

I. Aire d’étude	179
II. Cadres géomorphologique et chrono-stratigraphique des archives sédimentaires	183
III. Étudier les paléoenvironnements à l’aide de bioindicateurs	188
IV. Les écosystèmes passés étudiés par les phytolithes et les bioindicateurs siliceux	197
V. Étude des variations écologiques par les assemblages malacologiques	211
VI. Discussions	217

Chapitre 6 - Gestion de l'environnement urbain chez les Mayas : étude des assemblages de phytolithes de l'intrasite de Naachtun

I. Diversité des sondages étudiés à Naachtun avec les phytolithes	236
II. Résultats sur les assemblages de phytolithes en contexte intrasite	245
III. Interprétation paléoécologique et taphonomique des assemblages de l'intrasite	249

Chapitre 7 - Éléments d'histoire environnementale à Naachtun au sein des basses-terres centrales mayas

I. Un défrichement archaïque et anthropique à Naachtun (2000 – 1600 BCE)	259
II. Un lac au Préclassique à Naachtun ? (750 – 400 BCE)	273
III. Exploitation agricole du bajo au Préclassique récent (400 BCE – 150 CE)	279
IV. Transition Préclassique-Classique et période Classique à Naachtun (150 – 950 CE)	287
V. Disparition des perturbations écologiques post-classiques (> 950 CE)	292

Conclusion Générale	295
---------------------------	-----

Bibliographie	301
---------------------	-----

- INTRODUCTION GÉNÉRALE -

Cette dernière année 2019 a été le témoin de la popularisation de sujets liés au concept d'effondrement. Pas moins d'une quinzaine d'ouvrages parus cette même année en titrent, au moins en partie, le mot. Les épithètes financière, énergétique, sociale, (de la) biodiversité sont couramment associées aux crises modernes dans les différents médias. Mais, récemment portées par des mouvements sociaux, ce sont surtout les composantes environnementale et climatique de ces perturbations qui sont invoquées dans l'effondrement de nos sociétés thermo-industrielles modernes.

Ces considérations modernes trouvent écho dans la multiplication récente de travaux scientifiques traitant des changements climatiques et environnementaux passés, sur les territoires de sociétés humaines aujourd'hui éteintes, dont l'essai médiatique, critiqué, « Effondrement » de J. Diamond servait déjà de caisse de résonance en 2006. Les Mayas y sont présentés comme une civilisation surpeuplée ayant eu un impact destructif important sur les écosystèmes tropicaux forestiers, qui associé à un contexte politique stérile, ne leur aurait pas permis de perdurer à travers une période marquée par des changements climatiques. Parfaite réponse aux inquiétudes écologistes modernes, ces thèses catastrophistes résonnent pour certains archéologues comme une tentative admirable « *d'avertissement pour stimuler les consciences vertes actuelles* » (Gause, 2014), mais dont le récit est jugé non-fidèle à la complexité des épisodes de déclin mayas.

L'une des critiques récurrentes à cette démarche repose en partie sur l'argument d'un « déterminisme » environnemental, non-nommé, de l'auteur qui se détacherait trop des conceptions anthropiques de l'archéologie (Powell, 2008 ; McAnany & Yoffee, 2010 ; Gause, 2014). Dans sa critique de l'ouvrage « Questioning collapse » (McAnany & Yoffee, 2010), Kohler (2011) rapporte des « textes [...] à la posture anthropologique étroite » et incite à reconsidérer l'ouvrage de Diamond (2006) qui « intègre(r) cette discipline négligée qu'est l'histoire naturelle ». Djindjian (2010) rapporte que cette posture se reflète chez les étudiants en archéologie qui perçoivent leur discipline comme plus proche des sciences humaines et sociales que des sciences naturelles. L'auteur interprète cette position comme héritée d'une tradition académique, ne cherchant pas à dégager des lois générales. Finalement, il semble qu'en archéologie, l'étude de l'impact des systèmes naturels sur les sociétés humaines, ou inversement, est souvent un choix méthodologique qui découle de préférences disciplinaires liées aux paradigmes dominants ou émergents (Lucas, 2017).

Le choix d'appliquer un « déterminisme » environnemental a été promu, lui, par l'école archéologique dite processuelle (ou post-processuelle) qui soutient l'existence de systèmes fondamentaux dans la nature, que la culture et les individus sont impuissants à détourner (Hodder & Hutson, 2003). En d'autres termes, l'environnement définit le cadre (ou seuil) dans lequel les groupes humains existent et tout changement dans ce cadre implique inévitablement les hommes qui y vivent (Arponen et al., 2019). Les études paléoenvironnementales comportant des problématiques archéologiques, s'intéressent aux

changements de seuils dans l'environnement et parallèlement donc, aux perturbations résultant (des) ou affectant les sociétés humaines. Cette démarche, qualifiée de déterministe, si elle reconnaît l'importance des sociétés, des cultures et des individus dans les reconstitutions historiques, choisit d'en faire abstraction dans son analyse en raison que la méthode naturaliste ne permet pas de les traiter ou de les acquérir. Elle apparaît alors comme un pan complémentaire à l'étude des sites et civilisations archéologiques et joue, aujourd'hui, un rôle indispensable dans les recherches interdisciplinaires de reconstitutions des interactions sociétés-environnements (Robert & Chenorkian, 2014).

Ce sujet de thèse s'inscrit pleinement dans ce cadre de réflexion épistémologique. Attentif à construire un discours interdisciplinaire, ce travail combine des approches naturalistes – *comme la perception taxonomique de changements écologiques* – et géographiques – *comme la reconstitution multiscalaire de ces dynamiques* – au sein des problématiques archéologiques du projet Franco-Guatémaltèque *Naachtun Petén Norte* (UMR8096 ArchAM, MAE, Pacunam, Perenco). De manière plus détaillée, ces recherches paléoenvironnementales, conduites à partir des enregistrements sédimentaires intra et hors-sites du territoire de Naachtun, ont pour but **d'identifier des variations – les effets de seuil – dans l'histoire des communautés végétales**. Ces changements de cadres écosystémiques à l'échelle du territoire sont alors à mettre en regard des connaissances acquises sur les mutations culturelles du site et de la région. Ainsi, la confrontation de ces données paléoenvironnementales et archéologiques à différentes échelles permettra d'identifier les réponses des écosystèmes aux facteurs climatiques et / ou anthropiques et de mesurer la part de chacune de ces variables dans cette évolution. En dehors d'un simple parallélisme des effets de seuils, **cette confluence méthodologique permettra aussi de questionner la perception qu'entretiennent les sociétés mayas de leurs écosystèmes, en évaluant la part imputable des interactions Homme-milieux aux changements environnementaux**.

Naachtun : Site perdu dans les basses-terres mayas (Chapitre 1 ; Fig 0.1)

Naachtun est le dernier grand site archéologique maya du Guatemala à avoir fait l'objet de fouilles lancées à partir de 2010 (Nondédéo et al., 2012). Il est situé à l'extrême nord du pays au sein des basses-terres, sur un plateau de faible altitude, karstique et abondamment faillé. Le paysage se compose donc d'une alternance d'escarpements et de dépressions karstiques, nommées *bajo*, où les eaux de surface se résument à de rares lacs et marais. L'alternance d'une saison pluvieuse puis sèche au cours de l'année, les sols peu épais et peu organiques ainsi que des écosystèmes majoritairement forestiers et denses représentent autant de facteurs défavorables aux occupations humaines.

Pourtant, les sociétés mayas qui ont occupé cette région pendant 3 millénaires (2000 BCE – 1000 BCE), sous forme de cité-états interconnectées et/ou rivales, ont laissé de nombreux témoignages architecturaux et archéologiques (Demarest, 2004). Les dernières estimations

démographiques, à l'aide d'un LIDAR sur la région des basses-terres dans le Petén, font état de 7 à 11 millions d'habitants (Canuto et al., 2018). Cette forte concentration de populations dans des écosystèmes fragiles et peu producteurs (Meggers, 1954) pose de nombreuses questions quant à leur adaptation ou leur impact sur l'environnement.

A partir des années 70, l'archéologie traditionnelle centrée sur le bâti et le site s'ouvre vers de nouvelles voies de recherche pour étudier les zones périphériques aux sites, considérées comme « vides » jusqu'alors (Lemonnier, 2006). Si les premières études portent sur l'agriculture en marge des sites, elles documentent très vite les environnements sur le territoire des sites à partir de méthodologies géologiques ou naturalistes. Les registres fossiles ont amené les chercheurs à améliorer leur connaissance sur l'agriculture et les interactions entre les humains et leur environnement. On retrouve ici un lien, devenu nécessaire, entre les disciplines de l'archéologie et celles de la géomorphologie et de la paléoécologie. Ainsi, dans cette région de forêt tropicale où la végétation représente la part la plus remarquable du paysage mais également une source indispensable de ressources (aliment, culture, énergie, matériau, ombre, ...), les études paléoenvironnementales modernes s'orientent vers la reconstitution des communautés végétales du passé.

Phytolithes et écosystèmes tropicaux passés (Chapitre 2 ; Fig 0.1)

Cependant, reconstituer les écosystèmes passés dans les basses-terres tropicales de la péninsule du Yucatán – comprendre les « basses-terres mayas » - pourrait s'illustrer du fameux vers de Lamartine (1820) « *Un seul être vous manque, et tout est dépeuplé !* ». La quasi-totalité, pour ne pas dire l'ensemble, des publications traitant des reconstitutions d'écosystèmes dans les basses-terres mayas recoure uniquement aux assemblages palynologiques (Islebe, 1996 ; Leyden, 2002 ; Carozza et al., 2007 ; Wahl, 2006, 2013 ; Carrillo-Bastos et al., 2010 ; Torrescano-Valle & Islebe, 2015 ; Krause et al., 2019). En effet, les autres bioindicateurs de la végétation (graines, charbons, élytres, etc.) ne sont que rarement invoqués ou s'ils le sont, restent une donnée complémentaire et marginale du travail. Ces études ne se concentrent d'ailleurs que sur les sédiments de plan d'eau pérennes (Lacs, étangs, ...), plutôt rares dans la région karstique des basses-terres mayas. En effet, les tests de présence pollinique sur les sédiments de zones marécageuses saisonnièrement inondées, dont le *bajo* de Naachtun, attestent de concentrations de pollen appauvries.

Souvent délaissés par les paléoenvironnementalistes, les phytolithes – des biominéralisations végétales d'opale de silice – constituent pourtant une alternative profitable aux pollens comme l'ont montrées des études récentes sur les écosystèmes néotropicaux passés (Piperno, 1994 ; Iriarte et al., 2010 ; Watling et al., 2017). Formés dans les tissus de la plupart des végétaux terrestres, leurs morphologies diverses peuvent témoigner de certains taxons. Plus denses que les pollens ou certaines graines, les phytolithes, après décomposition des plantes, sont enregistrés à proximité de leur lieu de dépôt, apportant une information locale (Madella & Lancelotti, 2012). Enfin, leur étude en

zone tropicale est notamment favorisée par une minéralisation permettant une bonne conservation, meilleure que d'autres bioindicateurs plus sensibles, dans des sédiments de textures variables. Cela se vérifie également à Naachtun ; les sédiments de la zone palustre présentant une bonne conservation de ces particules ainsi qu'une riche diversité de formes. Dans ce contexte environnemental, les phytolithes présentent le meilleur potentiel pour travailler sur la composante végétale des reconstitutions de paléoenvironnements. Pourtant, les études paléoenvironnementales régionales invoquant les phytolithes sont rares et partielles (Beach et al., 2009 ; Krause et al., 2019).

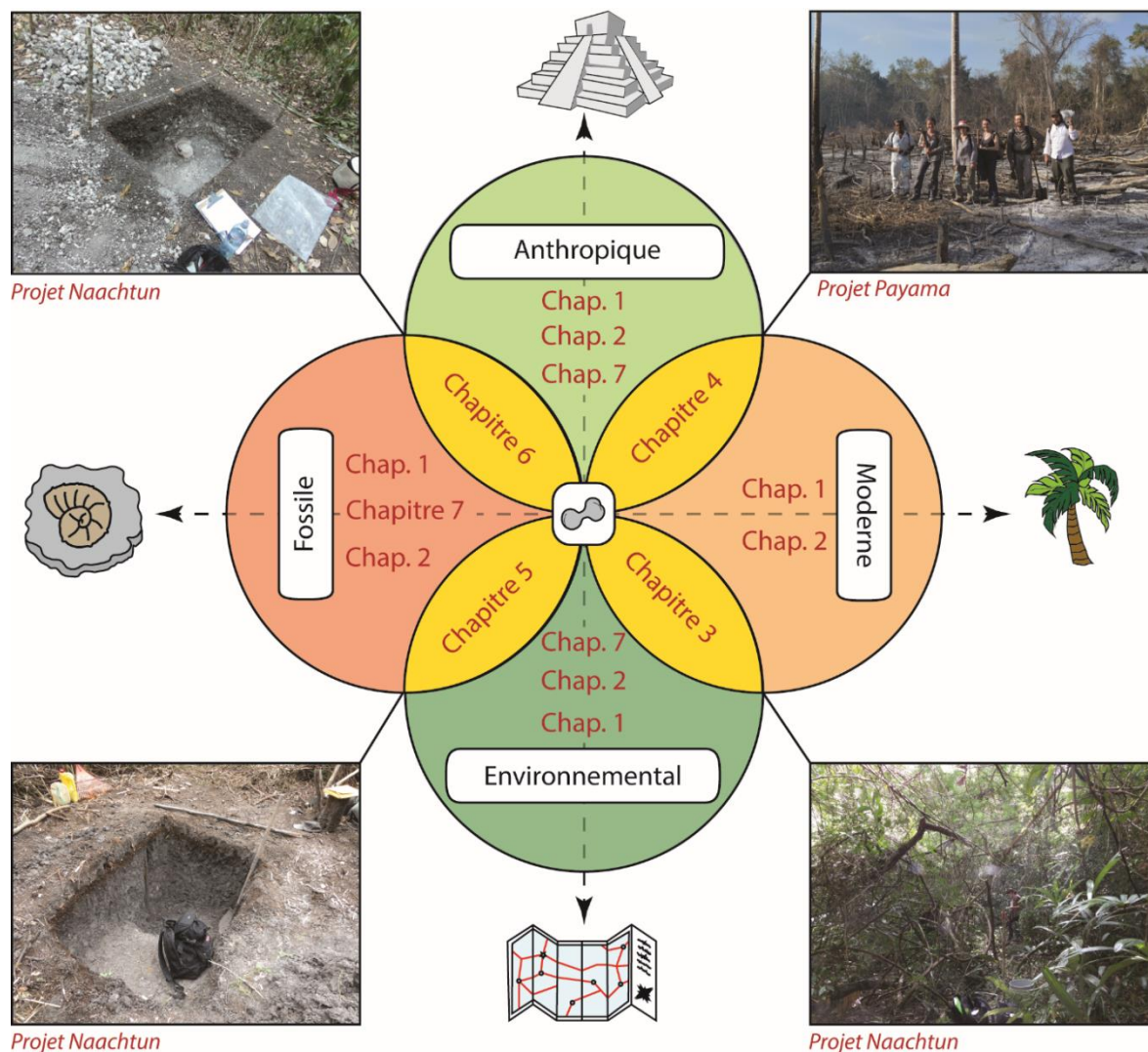


Figure 0.1–Schéma interprétatif de l'organisation des problématiques du manuscrit en fonction des grands axes de réflexion.

En effet, en dépit de leur conservation favorable, ils souffrent depuis longtemps d'une mauvaise réputation. A raison, de nombreux biais régissent l'utilisation de ces particules comme bioindicateurs taxonomiques : une espèce peut produire plusieurs phytolithes – la Multiplicité – qui peuvent eux-mêmes être produits par d'autres espèces – la Redondance – (Rovner, 1971 ; 1983). Ainsi, la résolution taxonomique est peu précise par rapport aux autres bioindicateurs. Les études environnementales, modernes et fossiles, menées à l'aide

des phytolithes doivent donc développer des approches différentes des autres bioindicateurs traditionnels, telles que des taxonomie et nomenclature parallèles (Madella et al., 2005 ; Neumann et al., 2019), des réflexions sur la base d'assemblages (Neumann et al., 2009 ; Dickau et al., 2013 ; Watling et al., 2013), la calibration écologique d'indices (Bremond et al. 2005a ; Garnier et al., 2013), qui sont représentatives d'une échelle régionale. Étant donné l'absence de travaux de référence sur les phytolithes en zone maya, cette thèse qui s'inscrit pleinement au sein de ces réflexions, présente un caractère exploratoire et novateur.

Phytolithes et paléoenvironnements à Naachtun – Approches et Problématiques

Ainsi, la **reconstitution des paléoenvironnements de Naachtun à l'aide des phytolithes** constitue le corps analytique de cette thèse. Toutefois, dans sa réalisation, ce sont différentes approches, possédant chacune ses propres problématiques, qui ont été menées. La figure 0.1 les résume et les place au croisement de deux systèmes de lecture que sont la temporalité et les échelles spatiales.

La première approche menée se base sur le principe d'actualisme. Cet uniformitarisme pose comme axiome que les processus modernes se sont également exercés dans le passé (De Wever et al., 2010). En effet, l'utilisation des phytolithes comme outil paléoenvironnemental, repose sur **l'évaluation de leur capacité à discriminer les écosystèmes des basses-terres mayas**. Si cela a été démontré pour des régions et écosystèmes néotropicaux (Dickau et al., 2013 ; Watling et al., 2016), ce n'est pour le moment pas le cas des grandes zones forestières du Petén. Le premier travail de recherche présenté dans ce manuscrit correspond à la construction d'un référentiel moderne des assemblages de phytolithes des écosystèmes de Naachtun (**chapitre 3**, Testé et al., 2020 - Fig 0.1).

Les premiers occupants des basses-terres mayas ont participé à la transformation des écosystèmes tropicaux de la fin l'Holocène. Ces bouleversements sont le fruit de pratiques agraires, d'adaptation des paysages à la demande en ressources naturelles (bois, eau, sol, ...). La deuxième approche s'intéresse au **potentiel bioindicateur des phytolithes à discerner ces signatures anthropiques** au sein des assemblages modernes. L'occurrence des phytolithes diagnostiques de *Zea mays* (le maïs) et du genre *Cucurbita* sp. (les courges), qui sont deux cultigènes répandus dans les cultures mayas, pourraient notamment servir d'indicateurs préférentiels à l'anthropisation d'un milieu. Ce second travail de recherche, réalisé dans le village forestier de Uaxactún, vise à comprendre la réponse taphonomique des assemblages de phytolithes aux pratiques agraires sous la forme d'un référentiel moderne de parcelles cultivant une diversité de cultigènes selon des pratiques différentes (**Chapitre 4**, Fig 0.1).

Afin de mieux contraindre la calibration des écosystèmes par les phytolithes, il est intéressant d'évaluer leur **complémentarité avec le signal écologique produit par d'autres bioindicateurs**. Les sédiments de Naachtun, à défaut de conserver les bioindicateurs organiques, présentent de riches assemblages de spicules d'éponges et de diatomées, mais également d'importantes cohortes de gastéropodes. Ainsi les concentrations relatives des microfossiles siliceux ont été appréciées en parallèle des assemblages modernes de phytolithes pour renforcer l'interprétation des conditions hydrologiques (**Chapitre 3 & Chapitre 4**, Fig 0.1).

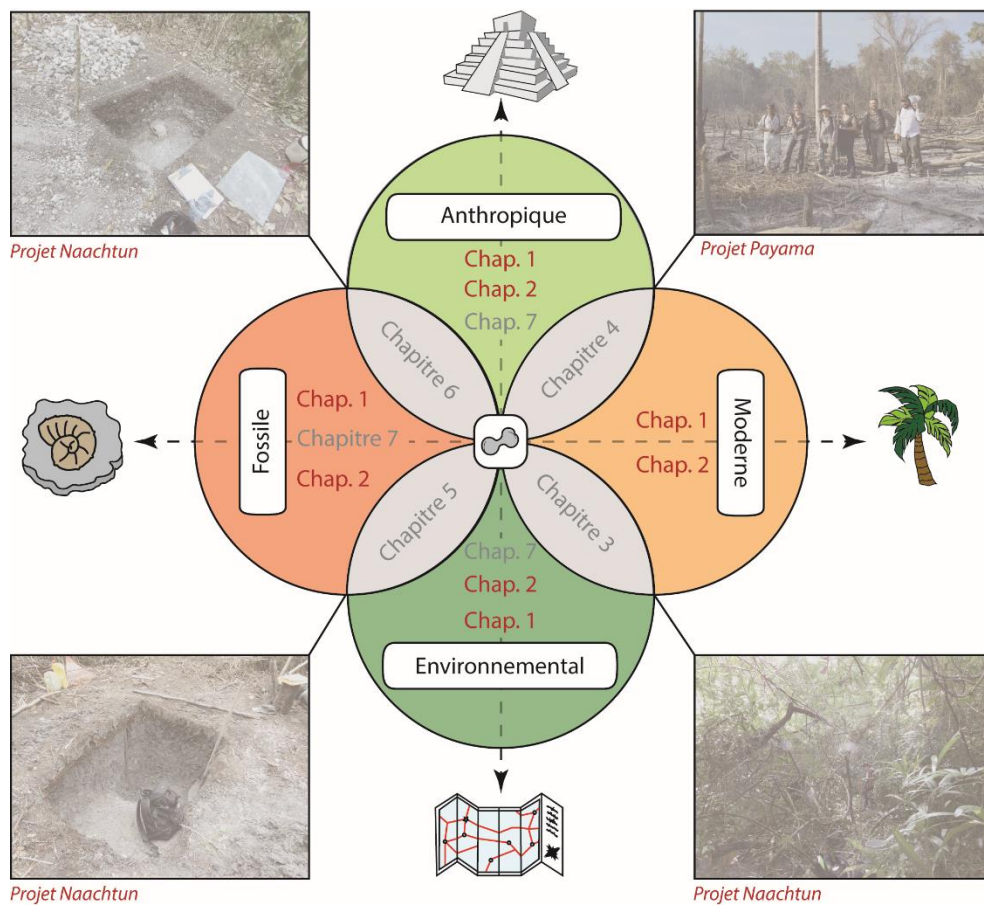
Une des incertitudes liées aux phytolithes dans ce contexte fossile est de savoir si les assemblages, potentiellement représentatifs de temporalités plus longues, vont pouvoir être traité au regard des analogues modernes. La reconstitution de l'histoire environnementale de Naachtun s'organise d'abord par une première phase d'étude des archives sédimentaires du *bajo* nord. En plus de se comporter comme des pièges à sédiments, ces contextes de *bajo* ont constitué des zones importantes de ressources pour les mayas, et semblent à même d'avoir enregistré les interactions entre les populations et leurs écosystèmes. L'attente principale de ce travail est que **les phytolithes puissent diagnostiquer des effets de seuil dans l'interprétation des communautés végétales préhispaniques**. Ces premiers résultats permettront de déterminer l'expression temporelle et spatiale de ces bioindicateurs lorsqu'ils sont utilisés sur des questionnements paléoenvironnementaux (**Chapitre 5** ; Fig 0.1).

Ce questionnement multiscalair se pose également par l'investigation des archives géoarchéologiques du site de Naachtun. Au plus proche des habitats, ces registres sédimentaires peuvent livrer des informations sur l'utilisation de l'espace intrasite et la gestion des ressources végétales et hydriques en son sein. A cette échelle de réflexion, la question principale concerne **l'interprétation des assemblages de phytolithes qui sont hérités des pratiques humaines**. Les assemblages des sondages géoarchéologiques de contextes différents (terrasses agricoles, jardins, aguadas, niveaux de terres noires, etc.) sont comparés temporellement afin de faire ressortir des phases dans l'occupation de cet espace urbain (**Chapitre 6** ; Fig 0.1).

Enfin la conjonction des acquis de ces deux contextes, eux-mêmes comparés à la littérature régionale, permet **d'identifier une coévolution entre la dynamique des paysages et l'évolution des pratiques sur le site**. L'élaboration d'une histoire environnementale de Naachtun ajoute une brique à la construction d'un modèle socioenvironnemental des basses-terres maya avant la période coloniale (**Chapitre 7** ; Fig 0.1).

PARTIE 1

‘ ‘BASSES-TERRES & PHYTOLITHES’ ’ CONTEXTUALISER LA RECHERCHE



- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 1 -

LES BASSES-TERRES TROPICALES MAYAS DANS LE TEMPS ET L'ESPACE

Les sociétés mayas des basses-terres se sont développées dans un environnement déterminé par une histoire géologique et écologique longue d'au moins 150 Ma. Formées par les sédimentations carbonatées des transgressions marines du secondaire et du tertiaire, les basses-terres de la péninsule du Yucatán – tectoniquement opposées aux hautes-terres du sud de la péninsule – représentent un corridor biologique préférentiel, qui à partir du Miocène va être le lieu de nombreux échanges biotiques. Les écosystèmes tropicaux, que rencontrent les premiers humains parcourant l'Amérique centrale à la sortie de la dernière période de glaciation du Quaternaire, sont hérités de cette histoire naturelle des basses terres. Il s'agit de forêts tropicales semi-sempervirentes dans un contexte climatique d'alternance de saisons sèche et humide, où l'importante diversité botanique est opposée à une pauvreté des faunes mammaliennes, pauvreté que l'humain amplifie à son arrivée sur le territoire américain.

C'est dans ce contexte environnemental que va se développer sur près de 4 millénaires (2000 BCE – 1500 CE) un ensemble de civilisations, allant du Mexique au Honduras, qui forme l'ère culturelle mésoaméricaine. Dominant pendant près de 3000 ans (2000 BCE - 1500 CE) la péninsule du Yucatán, la civilisation maya est remarquable par ses immenses cités à l'architecture monumentale et comptant plusieurs milliers d'habitants, dont notre site d'étude, Naachtun, en est un exemple. Cette cité, inscrite dans l'histoire de la période Classique de la civilisation (150 CE – 1050 CE), a été un centre régional important et a pourtant été abandonnée comme la plupart de ses voisines. L'abandon de ces cités, cet effondrement régional, conduit à la problématique de l'adaptation des mayas à ces écosystèmes tropicaux.

Ce questionnement de l'adaptation s'illustre notamment par le développement des recherches sur l'agriculture dans les basses-terres mayas. Certains auteurs voient les pratiques modernes d'abattis-brûlis itinérant, nommées *milpa*, comme traditionnelles et intensivement usitées par le passé. Cette pratique sur des terres tropicales et forestières, peu productive sur un temps long et gourmande en espaces, aurait ainsi joué un rôle dans un potentiel « suicide environnemental ». Cette vision minimise toutefois l'importance de la connaissance naturaliste et écologique par les mayas de leurs milieux qui s'est traduite par la diversité de leurs pratiques agricoles. En effet, la culture vivrière du maïs est accompagnée de celle d'une large gamme de cultigènes, cultivée à la fois intensivement près des habitats sous forme de jardins domestiques et de manière plus extensive à distance des zones urbaines. Les populations mayas ont également laissé un témoignage de la richesse de ces pratiques par la modification des paysages, encore décelable aujourd'hui par la géoarchéologie, comme les champs surélevés, les canaux d'irrigation ou encore les terrasses agricoles sur pentes. On y voit alors une remarquable adaptation à l'environnement, qui par sa large expansion, continuera de susciter de nombreux débats sur la question du rôle de l'agriculture dans l'effondrement des civilisations des basses-terres du Petén.

- CHAPITRE 1 -

LES BASSES-TERRES TROPICALES MAYAS DANS LE TEMPS ET L'ESPACE

I. Histoire naturelle de la péninsule du Yucatán et de ses forêts

1. Origine géologique d'un contraste géographique

i). La plateforme carbonatée du bloc maya

De la plaine côtière de l'ouest (Mx) jusqu'au bassin Néogène du lac *Izabal* à l'est (Gt), on observe un décrochement senestre nommé faille de *Polochic* (Fig.1). Connectée, du nord au sud, aux failles *Motagua* et *Jocotan* (Fig.1), elles forment, réunies, un système de décrochement qui marque la frontière entre les plaques lithosphériques Caraïbe et Amérique du Nord (Wadge et Burke, 1983 ; Lyon-Caen et al., 2006), et qui sépare l'Amérique centrale en deux blocs tectoniques (Fig1.1) : le bloc *Chortís* au sud et le bloc *Maya* au nord (Dengo, 1969 ; Martens et al., 2007). Le bloc *Maya* constitue la partie sud de la plaque Amérique du Nord et comprend le Belize, le nord du Guatemala, la péninsule du Yucatán (Mx) et la région du Chiapas (Mx). Le sud du Guatemala, le Honduras, le Salvador et une partie du Nicaragua sont intégrés au bloc *Chortís* (Dengo, 1969).

Le complexe ophiolitique (Fig1.1 - serpentinites) associé à la faille *Motagua* témoigne d'un domaine océanique présent dès le Jurassique entre le bloc *Chortís* et le bloc *Maya* (Fourcade et al., 1994 ; Martens et al., 2007). Son apparition correspond à l'ouverture d'un corridor marin intra-Pangéen au moins dès l'Oxfordien (160 Ma) reliant le domaine Pacifique à la Téthys (Fig 1.2). Dès le Tithonien (150Ma), ce corridor marin est composé, d'ouest en est, d'un proto-océan Atlantique nord, d'une proto-mer des Caraïbes et d'un tout jeune golfe du Mexique (Sheridan et al., 1988; Marton et Buffler, 1999; Iturralde-Vinent, 2003). Sur cette même période, l'ouverture du golfe du Mexique entraîne une sédimentation peu profonde sur le pourtour du bloc *Maya*, aujourd'hui marquée par des évaporites et dolomies (Michaud et Fourcade, 1989).

Au cours de l'Albien-Cénomaniens (110-95 Ma), un phénomène mondial d'eustatisme, lié à un phénomène de subsidence régionale (Haq et al., 1987), conduit à une transgression marine affectant le pourtour du golfe du Mexique. La majeure partie du bloc *Maya* devait être à cette époque recouverte par une mer peu profonde (Iturralde-Vinent, 2004). Les sédiments associés à cette période correspondent à des dolomies et des évaporites et sont identifiés au nord de la faille *Polochic* jusque dans le Yucatán (Michaud et Fourcade, 1989).

Au Campanien (75Ma), une importante phase tectonique entraîne un fractionnement du bloc *Maya* en bassins profonds et plateformes (Carfantan, 1985). L'enneigement progressif du bloc *Maya* se traduit par une sédimentation plus carbonatée au sud du bloc (Fig 1.1 ; Petén (Gt), centre-Guatemala, Chiapas (Mx), Belize) quand la sédimentation au nord de cette zone (Yucatán) reste à dominante dolomitique et évaporitique (Michaud et Fourcade, 1989).

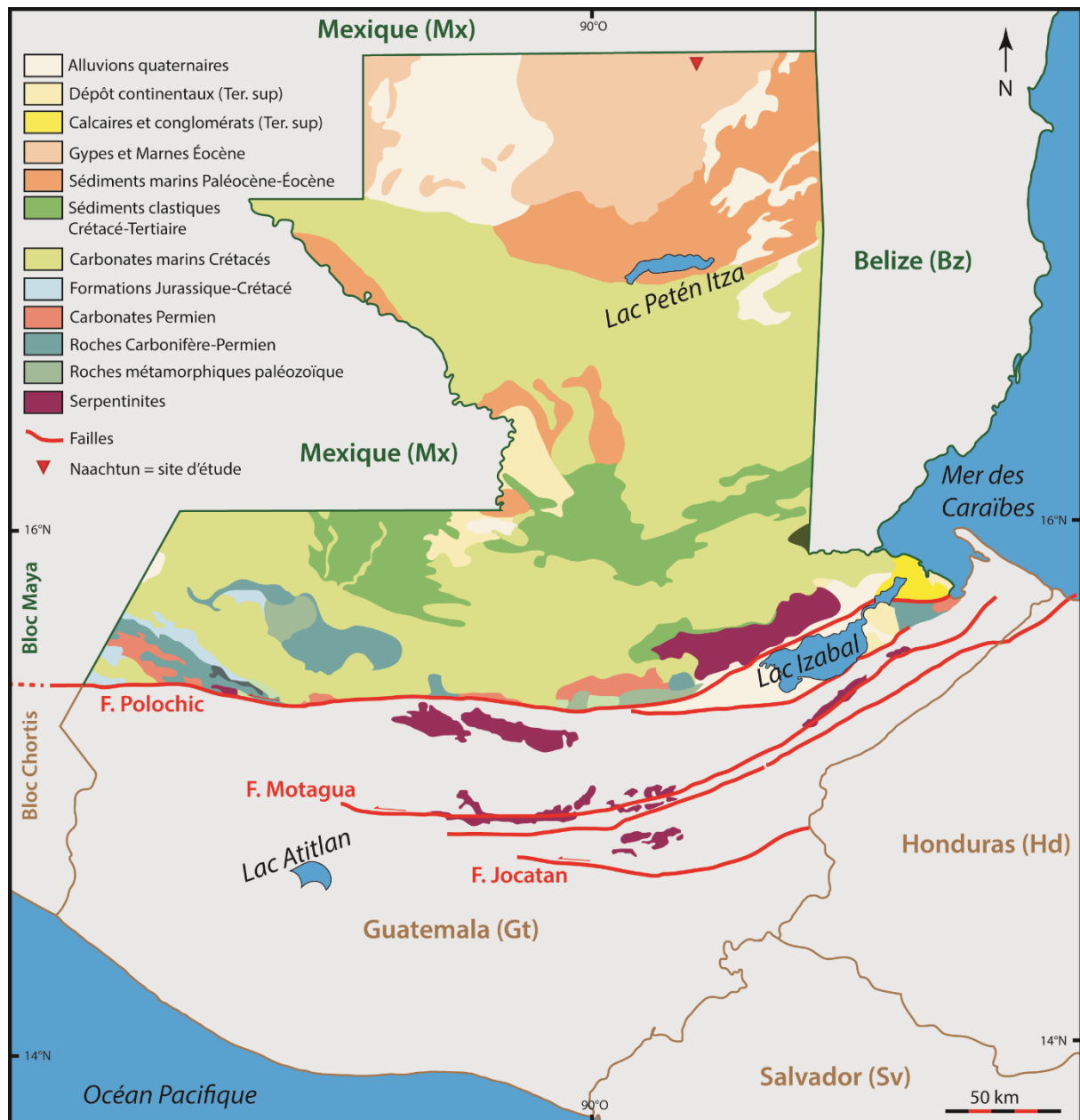


Figure 1.1 – Carte géologique résumée de la partie guatémaltèque du bloc *Maya* (modifié d’après Weyl, 1980 et Fourcade et al., 1994). Naachtun, le site d’étude, est localisé dans les gypses et marnes Éocène du nord du Guatemala.

A l’Éocène (55Ma), le Yucatán devient une plateforme carbonatée (Iturralde-Vinent, 2006) en eau peu profonde, entourée par les eaux profondes du golfe du Mexique et de la mer des Caraïbes (Fig 1.2). L’élévation générale des terres d’Amérique centrale à la transition Éocène-Oligocène (MacPhee et Iturralde-Vinent, 1995) coïncide avec une importante régression marine (Miller et al., 2003). La majeure partie du bloc *Maya* est alors émergée. Malgré des périodes d’incursions marines à l’Oligocène (25Ma) et au Miocène (15 Ma), on peut considérer que la géologie sédimentaire du bloc *Maya* va peu évoluer à partir de cette période en dehors des zones littorales ou de très faibles altitudes. C’est également à ce moment que se fait la jonction finale des blocs *Maya* et *Chortís* (Fig 1.2).

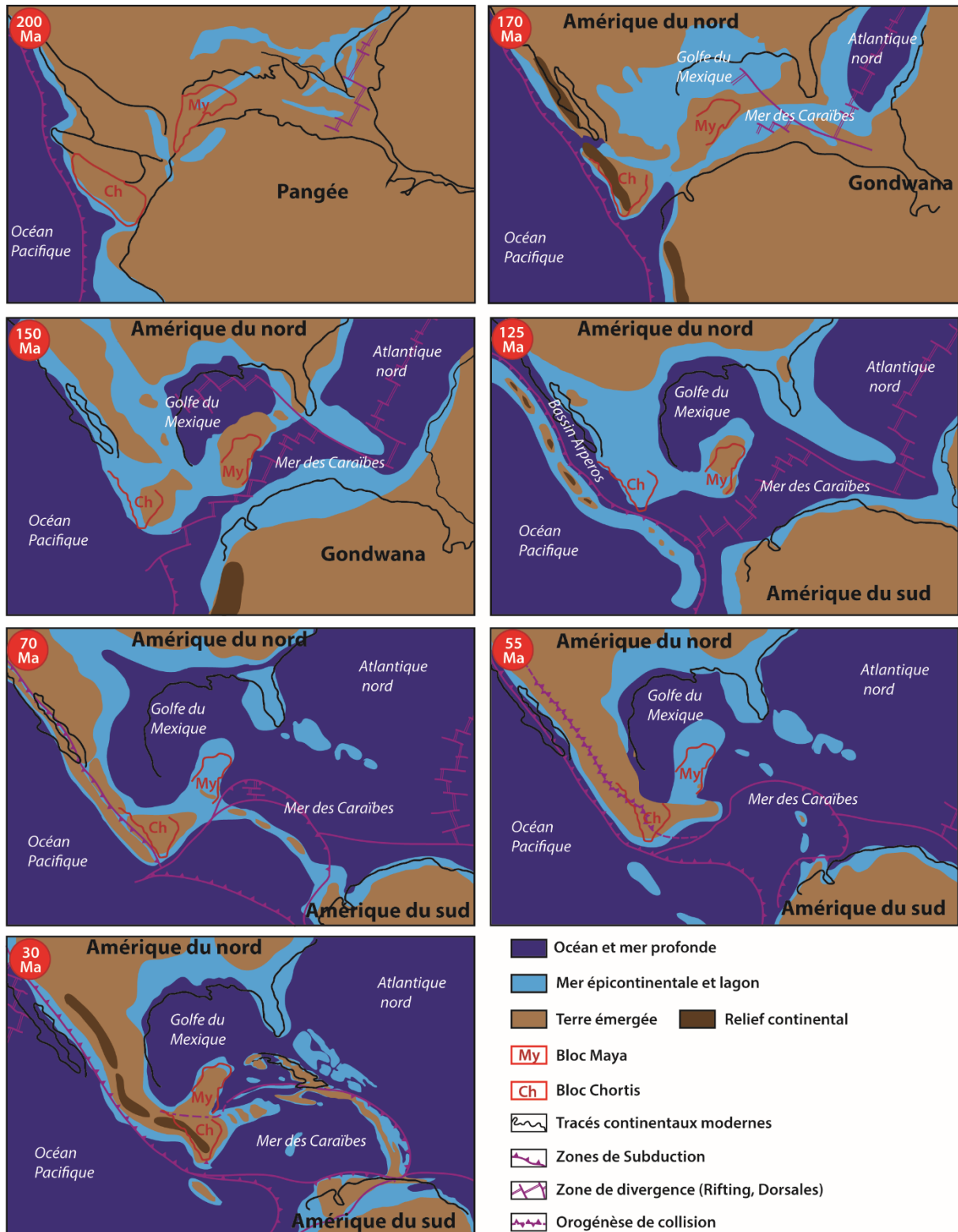



Figure 1.2 – Reconstitution paléogéographique Méso-Cénozoïque centrée sur les mouvements des blocs Maya (My) et Chortis (Ch) (modifiée d'après Itturalde-Vinent, 2006).

ii). Formation des reliefs montagneux du Guatemala

Au Jurassique moyen, alors que la Téthys s'ouvre entre l'Amérique du Nord et l'Afrique pour former le futur océan Atlantique nord (Aubouin, 1977 ; Fig 1.2), la marge pacifique de l'Amérique du Sud est soumise à une subduction, en activité probable depuis le Trias. Cette

subduction vers l'est, engendre un arc magmatique continental, bordé côté continent par des bassins arrière-arc subsidés (Dercourt et al., 1993). La croissance de ce relief est stoppée par l'arrêt de la subduction, au sud de la Californie, à la fin du Jurassique.

A l'Ouest du Mexique, dès le Crétacé inférieur, le bassin océanique d'Arperos récemment ouvert, est rétréci par une subduction vers l'ouest donnant naissance à un arc volcanique intra-océanique (Fig 1.2). Ce Bassin d'Arperos va se fermer au Crétacé supérieur, entamant une collision arc-continent (Garcia-Diaz, 2004). Cette accrétion va entraîner un accroissement d'un tiers de la partie continentale mexicaine de la plaque Amérique du Nord lors de la transition Crétacé/Paléogène. À la suite de ce chevauchement, il se forme un édifice montagneux de collision.



Point Tardigrade : Cratère de Chicxulub

Le nord-ouest du Yucatán, est marqué par le cratère d'impact de *Chicxulub*. D'environ 180 km de diamètre, il a été formé par la chute d'un astéroïde à la toute fin du Crétacé (66Ma). Le Cratère, est aujourd'hui comblé par des sédiments Tertiaire. Ce bolide expliquerait la couche d'Iridium de la limite Crétacé-Paléocène (Alvarez et al., 1980) et est également invoqué dans l'évènement d'extinction biologique de cette période.

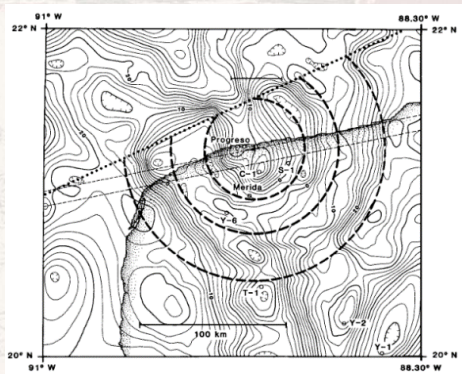


Figure T1 – Anomalie gravimétrique couvrant l'angle nord-ouest du Yucatán sur la position du cratère de Chicxulub (Hildebrand et al., 1991)

Au cours du Paléocène (60Ma), la phase tectonique Laramienne, marquée par la subduction de la paléo-plaque Farallon sous la plaque nord-américaine (Sigloch et Mihalyuk, 2013), va entraîner un raccourcissement est-ouest des reliefs continentaux. Ce raccourcissement est marqué par de nombreux plis et chevauchements. A l'Eocène, la subduction de la plaque Farallon se manifeste dans l'ouest du Mexique et sur le bloc Chortis par la formation d'un plastron volcanique (Fig 1.2). Cette convergence tectonique va se poursuivre jusqu'à la fin de l'Oligocène (20Ma).

Au milieu du Miocène (15Ma), la plaque pacifique va entrer en subduction avec la marge mexicaine. La subduction de la plaque Farallon continuera en Amérique du Nord tandis que sur la marge pacifique du bloc Chortis, c'est une plaque récemment formée, la plaque Coco, qui entre en subduction (Schellart et al., 2010). Ces nouvelles conditions tectoniques vont entraîner la formation de nouvelles structures de plissements dans les reliefs montagneux mais également mettre en place le système de failles transformantes *Polochic-Motagua*, structurant ainsi la limite des plaques Amérique du Nord et Caraïbe. Les derniers plissements de la chaîne de collision datent de la fin du Miocène (5Ma) et constituent la dernière phase de structuration tectonique des hautes-terres guatémaltèques (Carfantan, 1985). Enfin la subduction de la plaque Coco sous la marge guatémaltèque va entretenir la formation d'un

arc volcanique continental, une cordillère, attenant à la chaîne de montagnes formée au Crétacé.

iii). Opposition géographique des hautes-terres et basses-terres

Cette histoire géologique structure la géographie du Guatemala et de la péninsule du Yucatán, en trois principales zones géomorphologiques. Le long d'un transect sud-nord, ces zones géomorphologiques peuvent être définies selon une opposition hautes-terres et basses-terres (Fig 1.3).

La côte pacifique est bordée par une plaine de 50km de large qui est généralement nommée **zone pacifique**.

Cette plaine est bordée par une première chaîne de montagnes, la *Sierra Madre*, qui traverse le pays selon un axe nord-ouest/sud-est. Ce relief, hérité de la subduction Cocos, se poursuit au nord (Mexique) le long de la cordillère d'Amérique centrale, mais également vers le sud (Salvador, Honduras) malgré des altitudes moins marquées. La plupart des grands volcans guatémaltèques appartiennent à cette zone et attestent du fonctionnement de la subduction. La *Sierra Madre* est accompagnée de chaînes de montagnes parallèles et d'une série de hauts plateaux. Ces montagnes calcaires issues des mouvements orogéniques Crétacé-Paléocène (Enjalbert, 1967) se suivent d'ouest en est. La partie ouest du Guatemala est dominée par les *Altas Cuchumatanes* dont certains sommets dépassent les 3000 mètres d'altitude. Vers l'est, on retrouve la *Sierra del Santa Cruz* et la *Sierra de las Minas* qui suivent respectivement le parcours de la faille *Polochic* et de la faille *Motagua*.

Ces zones de haut-relief couvrent environ 50% du territoire guatémaltèque et forment une région que l'on nomme **hautes-terres** (Fig 1.3). Il s'agit également de la principale ligne de séparation des eaux du pays creusant de profondes vallées dans ces reliefs en direction du pacifique, du golfe du Mexique ou de la mer des Caraïbes (Fig.3).

On définit la zone au nord de ces hautes-terres comme une vaste plaine de faible altitude (entre 100 et 400m) nommée **basses-terres** (Fig 1.3). Au Guatemala, elles sont quasi-exclusivement représentées par le département du Petén, tandis qu'elles composent la majeure partie du Belize et de la partie mexicaine de la péninsule du Yucatán. Le substratum se compose exclusivement d'épaisses couches carbonatées méso-cénozoïques pour la plupart faillées et karstifiées lors des phases tectoniques cénozoïques (Fig 1.1). Cette karstification, c'est-à-dire cette dissolution superficielle et profonde des carbonates formant un réseau de cavités facilitant la circulation des eaux, explique en partie la faible présence de réseaux hydrographiques de surface. Le nord-est du Petén présente la partie méridionale d'une région légèrement surélevée nommée « Elevated Interior Region » (Fig 1.3) dont l'extension recouvre une grande partie de la péninsule du Yucatán (Dunning et al., 2012).

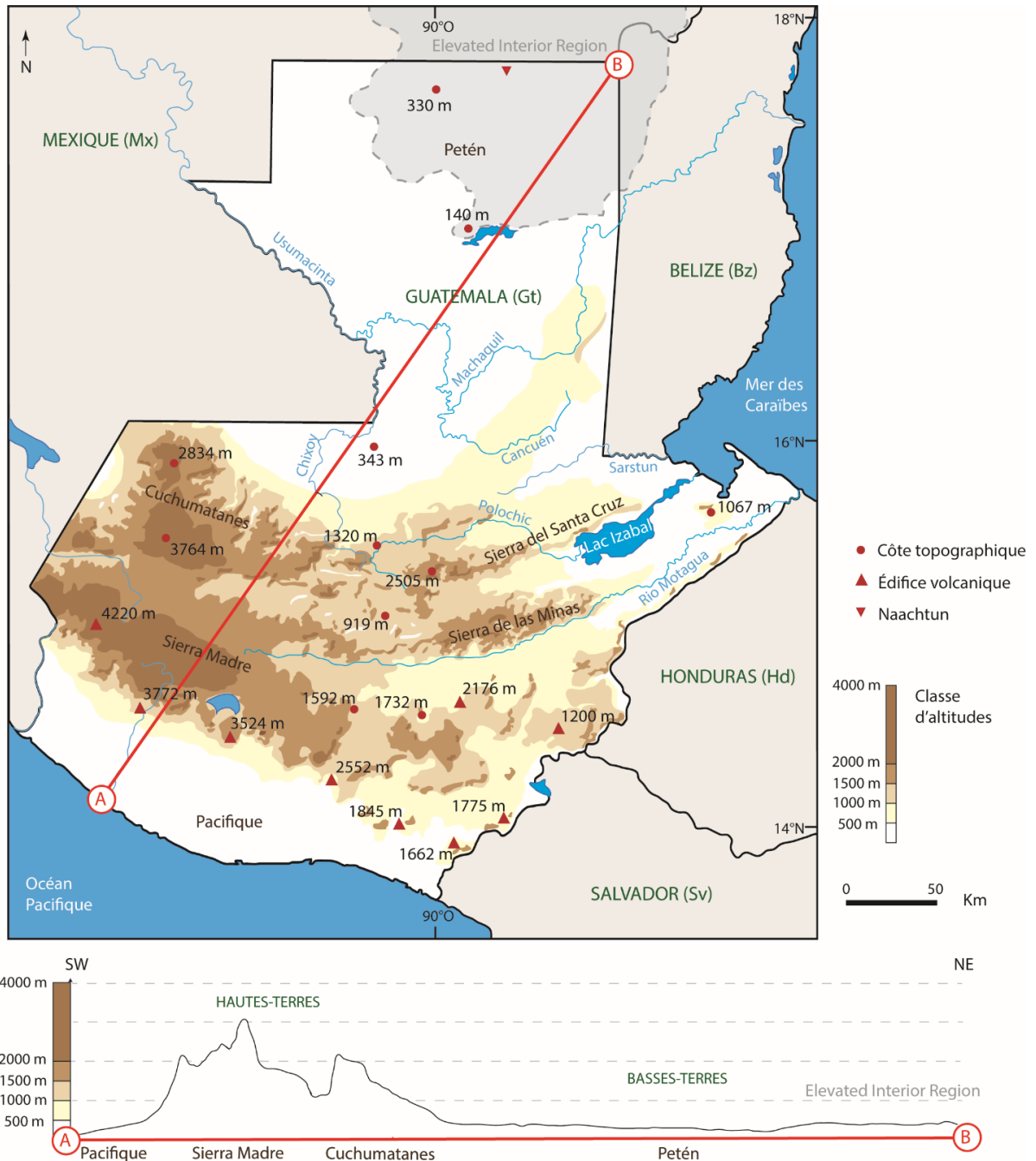


Figure 1.3 – Carte des reliefs du Guatemala (modifié d’après l’Institut National de Statistiques du Guatemala, 2002) illustrée par un transect des domaines géomorphologiques.

Ce contraste géomorphologique marqué a joué, et joue toujours, un rôle sur l’histoire écologique de l’Amérique centrale. Cela s’explique tant par un contrôle climatique induit par les reliefs que par un contrôle des migrations de populations biologiques séparant ainsi l’Amérique centrale en grandes zones climatique et écologique.

2. Histoire des contraintes environnementales des basses-terres mayas

i). Origine Paléogène de la forêt tropicale en Amérique

La forêt tropicale humide des basses-terres néotropicales (Amazonie, Petén, Panama...) est aujourd'hui située à basse altitude, à 700 m ou moins, au-dessus du niveau de la mer (Harling, 1979 ; Jørgensen et León-Yáñez 1999). Elle est dominée par les angiospermes, avec plus de 80% des individus et des espèces de plus de 10 cm de diamètre appartenant soit à la famille des palmiers (Arecaceae) soit à celle des angiospermes dicotylédones (Puig, 2001 ; Burnham et Johnson, 2004). Cette répartition ne s'explique qu'au regard de la paléogéographie méso-cénozoïques vu précédemment (Fig 1.2).

La distribution de genres d'angiospermes communs entre l'Amérique du Sud et l'Afrique et parfois l'Asie du Sud-Est implique que l'origine des taxons, présents dans les forêts tropicales actuelles, est antérieure à la séparation finale des continents (Aubreville, 1974), c'est-à-dire au moins au Crétacé inférieur (Salard-Cheboldaëff et Dejax, 1991 ; Doyle, 1998). On retrouve deux grands types de flores pour cette période. Les continents au nord de la Téthys et du nouvel océan Atlantique (Amérique du Nord, Eurasie) forment le domaine de la Laurasia, quand les continents localisés au sud de cette limite (Afrique, Amérique du Sud, Antarctique), forment le domaine du Gondwana (Buffetaut et Le Loeuff, 1998).



Point Tardigrade : Les Angiospermes

Les Angiospermes, signifiant "graine encapsulée", regroupe les végétaux terrestres caractérisés par la présence de fleurs. Les plus anciennes plantes à fleurs sont représentées par le genre *Archaeoфраuctus* sp., et datent du Crétacé (Sun, 2002). Des récentes découvertes pourraient faire reculer l'origine des angiospermes (Hochuli et Feist-Burkhardt, 2013, Li et al., 2019). Cela implique que les forêts du mésozoïque étaient majoritairement composées de Ptéridophytes et de Gymnospermes.



Figure T2 – *Archaeoфраuctus sinensis*
124.6 Ma Aptien (Sun, 2002)

A la fin du Crétacé, l'Amérique du Sud se sépare de l'Afrique et va commencer à occuper sa position actuelle tout en se rapprochant des domaines laurasien d'Amérique du Nord (Fig 1.2). A cette période, le sud de l'Amérique du Nord abrite de nombreuses familles et genres végétaux communs à la flore laurasienne d'Asie du Sud-Est (Graham, 1964). Ces flores se sont développées sous un climat tempéré chaud à subtropical et constituent un mélange d'essences tempérées et tropicales (Puig, 2001). Au contraire les sédiments sud-américain et africain, caractéristiques du domaine nord-gondwanien, ont délivré la plus grande diversité en pollens fossiles d'Angiospermes (Le Thomas et Doyle, 1996), avec des taxons différents du domaine laurasien (Van der Hammen, 1988). Si des études ont confirmé la présence d'Arecaceae dans les néotropiques dès cette période (Maury, 1930 ; Duarte et Japiassú, 1971 ;

Horrel, 1991 ; Mourier et al., 1988), les registres fossiles sont insuffisamment précis pour valider la présence d'une forêt tropicale au Crétacé (Burnham et Johnson, 2004).

Le début du Tertiaire est marqué par l'individualisation des flores de chaque continent. Malgré une diminution générale des températures au Paléocène (par rapport au Crétacé), le climat reste globalement chaud et l'ouverture de l'Atlantique Sud favorise l'apparition de conditions humides dans le bassin amazonien. La plupart des données paléobotaniques proviennent du nord du continent sud-américain (Van der Hammen et Wymstra, 1964 ; Van der Hammen et Garcia, 1966 ; Germeraad et al., 1968 ; Colmenares et Teran, 1993 ; Jaramillo et Dilcher, 2000) et présentent de nombreuses familles connues aujourd'hui dans les forêts tropicales des basses-terres (Annonaceae, Arecaceae, Burseraceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Sapotaceae, etc.).

La transition Paléocène-Éocène est marquée par un réchauffement des basses et moyennes latitudes (Zachos et al., 2001). Cette période de transition climatique semble avoir entraîné un renouvellement des flores (Colmenares et Teran, 1993 ; Rull, 1999 ; Jaramillo, 2002 ; Jaramillo et al., 2006) avec la disparition de taxons végétaux, et l'apparition de genres plus en affinité avec les forêts tropicales actuelles. Au début de l'Éocène, la présence de la forêt tropicale est attestée par les données fossiles macro et micropaléobotaniques, en Amérique du Sud, mais potentiellement aussi en Amérique centrale (Germeraad et al., 1968 ; Muller et al., 1987 ; Graham, 1995 ; Burnham et Graham, 1999). Ces reconstitutions sur la base de données paléontologiques sont appuyées par le développement de modèles écologiques (Frakes et al., 1992).

Après l'Éocène moyen (55Ma), le climat global montre un refroidissement avec une baisse rapide des températures à la transition Éocène/Oligocène (Zachos et al., 2001). Cette phase de refroidissement est associée à l'entrée en période « *Ice-house* » par la constitution d'une calotte polaire au sud (Miller et al., 1998) et la séparation entre l'Amérique du Sud et l'Antarctique. Avec des températures plus fraîches aux latitudes moyennes, les forêts tropicales ont subi un recul important vers les basses latitudes (Lelono et Morley, 2011). Ce recul a été particulièrement prononcé en Amérique centrale où les forêts tropicales n'ont pu se réfugier qu'au sud de la marge pacifique de la plaque nord-américaine (Wolfe, 1985 ; Burnham et Graham, 1999). Il est probable que beaucoup d'espèces tropicales d'Amérique centrale se soient éteintes à cette période (Morley, 2011). En Amérique du Sud, ce refroidissement a également entraîné un recul de la forêt tropicale dans le bassin de l'Amazone (Jamarillo et al., 2006).

ii). Évolution Néogène de la forêt tropicale en Amérique

La fin de l'Oligocène est marquée par une augmentation rapide des températures suivie de l'installation d'un climat globalement chaud lors de la transition Oligocène/Miocène (Zachos et al., 2001). Le réchauffement de la première partie du Miocène a entraîné une expansion

des forêts tropicales vers les zones sub-tropicales et littorales d'Amérique centrale (Wolfe, 1985).

A partir du Miocène moyen (15Ma), le climat entre dans une phase de refroidissement global, qui va s'accroître à partir du Pliocène moyen (2.8 Ma). Ce phénomène climatique a réduit les surfaces forestières tropicales à la seule zone des basses latitudes. Cette période va être marquée par l'avancée de taxons tempérés et froids provenant d'Amérique du Nord dans les flores centre-américaines (Graham, 1999) et de savanes boisées dans le bassin amazonien (Cerling et al., 1997 ; Retallack, 2001). Ces migrations vont également être favorisées par la connexion entre les deux continents américains au moment de la formation de l'isthme de Panama (5-3Ma ; Cf. I.1.2.iii), voire avant sa fermeture (Cody et al., 2010).

L'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire, notamment au Pléistocène, a poussé certains chercheurs à théoriser des zones de refuges de la forêt tropicale au cours de ces périodes (Puig, 2001). Ainsi, Toledo (1982) justifie la localisation de zones refuges pléistocènes au Chiapas, dans le Petén et au Belize par des fortes concentrations en espèces végétales endémiques. Sur cette même base, et celles d'études minéralogiques, des travaux en Amazonie vont arriver aux mêmes conclusions pour la Guyane (Prance, 1982 ; Granville, 1988), le Brésil et la Bolivie (Prance, 1982) et au Venezuela (Steyermark, 1982). A l'inverse, d'autres études palynologiques, menées en Amazonie, montrent la présence de communautés végétales étendues au cours du Pléistocène (Hooghiemstra et Van der Hammen, 1998 ; Colinvaux et al., 2000). Colinvaux et al. (2000) interprètent la théorie des refuges comme un biais d'échantillonnage et considèrent que les basses-terres d'Amazonie sont restées couvertes de forêts au cours du Pléistocène. D'autres études tendent à montrer que les changements dans les précipitations ont eu un effet mineur sur la continuité du couvert forestier amazonien (Bush et de Oliveira, 2006).

De même dans les basses-terres de la péninsule du Yucatán, la théorie des refuges n'est aujourd'hui plus soutenue. Les données climatologiques montrent un environnement froid au dernier maximum glaciaire (24 000 - 19 000 BP) mais encore humide (Bush et al., 2009). Ainsi les données palynologiques témoignent d'un environnement forestier mésique riche en chênes et pins mais n'enregistrent pas de « refuges » tropicaux (Leyden, 2002). La période post-maximum glaciaire (18 000 – 14 000 BP) montre un assèchement régional maximal des basses-terres qui se traduit par une installation de savanes et un recul des forêts mésiques (Leyden, 1987). L'amélioration des conditions climatiques sur la période 14 000 – 10 000 BP (Bush et al., 2009) correspond à un retour des taxons de forêts mésiques, puis à l'arrivée de Moraceae à partir de 12 000 BP qui deviennent majoritaires au début de l'Holocène (Leyden, 2002). L'enregistrement de taxons tropicaux correspondant à une zone de « refuge » au cours de cette dernière période glaciaire n'est pas non plus répertorié dans la région de Petén-Itza (Leyden, 2002). Les travaux menés par Aide et Rivera (1998) sur l'expression spatiale de la variabilité génétique de l'espèce *Poulsenia armata* en Amérique centrale les ont également poussés à remettre en cause l'hypothèse de grands refuges de forêts tropicales. Ils considèrent que les taxons tropicaux ont migré vers des zones littorales ou les zones

ripariennes. Poelchau et Hamrick (2013) ont modélisé la répartition d'espèces végétales du Pléistocène et en ont déduit qu'elles ne sont pas limitées aux zones de refuges. Ils proposent également que les forêts aient pu occuper de larges zones littorales laissées libres par la baisse du niveau marin.

A la fin du dernier épisode glaciaire, l'entrée dans l'Holocène est marquée par une augmentation des températures (Correa-Metrio et al., 2012). Cette période correspond à une augmentation des concentrations en pollens dans les sédiments, principalement pour les taxons arboricoles dont ceux des Moraceae (Leyden, 2002). La phase la plus humide de l'Holocène (10 000 – 8 000 BP) correspond à une phase d'installation de la forêt tropicale dans le Petén avec l'augmentation de pollens d'arbres appartenant aux familles modernes, dominées par les Combretaceae, Melastomataceae, Moaraceae et Urticaceae et la raréfaction des pollens d'herbacées (Islebe et al., 1996 ; Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2006). Les travaux menés dans le Quintana Roo et le Campeche montrent également des assemblages palynologiques de taxons tropicaux relativement modernes et associés à des conditions plus chaudes et plus humides (Carrillo-Bastos et al., 2010 ; Torrescano-Valle et Islebe, 2015). Leyden (2002) considère que les associations contemporaines de végétations des basses-terres sont en place dès l'Holocène inférieur (8 000 BP) ce qui implique des contrôles climatiques modernes dès cette période. Les communautés végétales plus sèches sont réparties sur la partie nord-ouest de la péninsule tandis que les végétations mésiques sont repoussées sur les zones plus montagneuses au sud (Leyden, 2002).

iii). Extinctions chez les mammifères du Néogène et du Quaternaire

À la suite du fractionnement du Gondwana (120 Ma), puis à la séparation avec l'Antarctique (36 Ma), l'isolation cénozoïque de l'Amérique du Sud a conduit au développement d'une diversité importante d'organismes animaux et végétaux, endémiques du continent (Simpson, 1950). La faune fossile la plus étudiée est celle des mammifères qui en Amérique du Sud sont majoritairement représentés par les groupes des Métathériens, des Marsupiaux, des Xénarthres, des Ongulés et des Rongeurs (Patterson and Pascual, 1968 ; Sánchez-Villagra, 2013 ; Chimento et al., 2015). A l'inverse, les faunes mammaliennes d'Amérique du Nord sont largement homogénéisées avec le continent Eurasien et plus diversifiées (Ridley, 2004). Elles sont représentées par des Ongulés, des Proboscidiens, des Carnivores et des Rongeurs (Sánchez-Villagra, 2013). Bien que des échanges nord-sud, sud-nord aient eu lieu au cours du Cénozoïque, c'est la formation complète de l'isthme autour de 2,5 Ma, qui va mener au grand échange inter-Amériques.

L'élargissement de l'Atlantique sud a provoqué au cours du Miocène puis du Pliocène, une remontée du continent sud-américain vers la plaque Caraïbes. Ce mouvement tectonique va engager une subduction de la plaque Caraïbe et former un arc volcanique océanique, amorçant ainsi la formation de l'isthme de Panama aux alentours de 3Ma (Cox, 2000). Ce modèle tectonique est aujourd'hui reculé dans le temps, puisque des travaux géochimiques

font remonter la formation de l'arc au Miocène (15Ma) et un comblement sédimentaire au début du Pliocène (5Ma) (Coates et al., 2004 ; Sepulchre et al., 2014 ; Montes et al., 2015). La formation de cet isthme coupe le fonctionnement des courants marins Atlantique-Pacifique, et établit une circulation par voie terrestre entre les deux continents américains.

Ainsi au moment de la fermeture de l'isthme de Panama, deux phases de migrations vont se mettre en place. Une première phase au cours de laquelle les paresseux terrestres géants, tatous, glyptodontes et quelques rongeurs d'Amérique du Sud vont remonter vers l'Amérique centrale et échanger leur place avec quelques mammifères placentaires d'Amérique du Nord. La seconde phase de migration inter-Amériques, autour de 2Ma, est légèrement diachronique et fortement dissymétrique (O'dea et al., 2016). Depuis l'Amérique du Sud, seuls quelques xénarthres, marsupiaux, un ongulé et potentiellement les quatre espèces actuelles de singes platyrrhiniens ont colonisé l'Amérique centrale et l'Amérique du Nord. A l'inverse, ce sont de nombreuses familles de carnivores, d'ongulés, de proboscidiens et de rongeurs qui prennent pied en Amérique du sud (Webb, 2006 ; Cody et al., 2010).

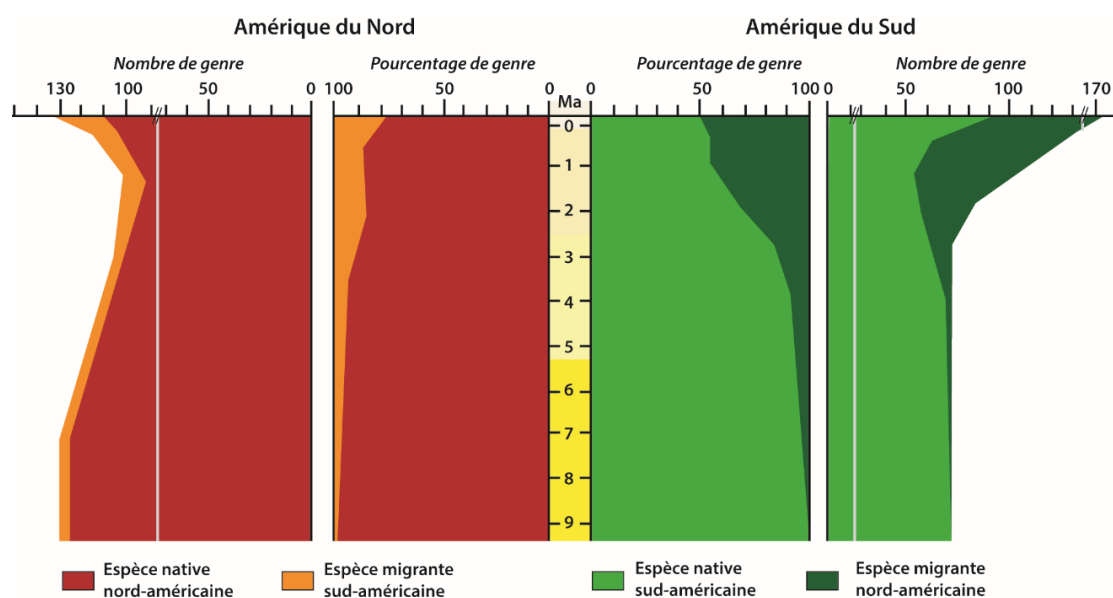


Figure 1.4 – Répartition des genres de mammifères depuis le Miocène supérieur pour les continents Nord et Sud-américains (modifié d'après Marshall et al., 1982).

Cette dissymétrie se retrouve aujourd'hui dans la composition actuelle des faunes mammaliennes (Ridley, 2004). La moitié des genres de mammifères, présents en Amérique du Sud aujourd'hui, sont directement originaires ou issus de l'évolution de lignées émigrées d'Amérique du nord. Cela s'explique par un faible taux d'extinction (seuls les chevaux et les gomphothères se sont éteints) et un fort dynamisme évolutif. En revanche du côté nord-américain, seul un genre sur dix qui composent la faune actuelle est d'origine sud-américaine (Marshall et al., 1982 ; Fig. 1.4).

La différence d'adaptation géographique des espèces nord et sud-américaines est à mettre en perspective avec les cycles climatiques du Quaternaire. Le climat plus froid et sec au cours des glaciaires aurait favorisé la migration et le maintien des espèces nord-américaines adaptées à

ce type de conditions environnementales. Les espèces sud-américaines, plus inféodées aux milieux de forêts tropicales n'auraient pas pu se maintenir en Amérique centrale et du nord. A l'inverse pendant les périodes interglaciaires, les mammifères nord-américains pouvaient survivre en occupant les domaines d'altitude des Andes ou en descendant dans les régions plus au sud (Lecointre et Le Guyader, 2006).

A la fin du Pléistocène, certaines extinctions de mammifères sont également à mettre en perspective avec les premiers peuplements humains des Amériques. En effet, de nombreux travaux archéologiques datent les premières traces humaines sur le continent américain à la fin du Pléistocène (Bonatto et Salzano, 1997 ; Waters et al., 2011 ; Lahaye et al., 2013 ; Dillehay et al., 2015 ; McLaren et al., 2018). A cette même période, de nombreux genres de mammifères nord et sud-américains, adaptés aux cycles glaciaires du Quaternaire connaissent une vague d'extinction. Aucun mammifère migrant sud-américain de plus de 10kg et aucune espèce sud-américaine native de plus de 65kg n'ont survécu à cette période. Il est également à noter que toute la mégafaune américaine supérieure à 1 tonne s'est également éteinte à cette période (Kemp, 2005). Ainsi, les proboscidiens, les grands xénarthres comme le glyptodon ou les paresseux géants, les lions et smilodons américains, les grands ongulés, et la majorité des marsupiaux (hormis les opossums) ont aujourd'hui disparu des Amériques.

L'implication des premières populations américaines et leur rôle dans l'extinction de la mégafaune du continent reposent sur de nombreux arguments (Martin, 1973 ; Grayson, 2001 ; Fiedel et Haynes, 2004 ; Burney et Flannery, 2005 ; Haynes, 2018). Parmi ces arguments, on peut citer :

- Les espèces, ayant disparu à cette période, s'étaient adaptées aux cycles glaciaires quaternaires.
- L'extinction américaine, concorde avec l'extinction de la mégafaune en Océanie (Roberts et al., 2001), derniers continents à avoir été peuplés par les humains.
- Le synchronisme entre l'arrivée des populations humaines et l'extinction de la mégafaune.

Il est possible que le climat ait joué un rôle dans l'extinction de la mégafaune. Toutefois à ce jour, aucun modèle climatique ne peut expliquer ces extinctions à l'échelle du continent américain (Bartlett et al., 2016). De plus, le changement climatique n'a eu que peu d'effet sur la mégafaune des régions africaines et sud-asiatiques.

3. Géographie moderne des basses-terres mayas, héritage d'une histoire naturelle

Après 65 Ma d'histoires géologique et naturelle décrites précédemment, les populations mayas des basses-terres guatémaltèques vont se développer dans un environnement déterminé et structuré géographiquement et écologiquement depuis au moins 5 à 10 000 ans.

Les basses-terres du Guatemala, et en particulier, la péninsule du Yucatán, correspondent à une plaine ouverte sur la mer des Caraïbes et le golfe du Mexique, formée par une plateforme

carbonatée de basse altitude (< 400m, Vidal-Zepeda, 2005) issue de dépôts marins méso-cénozoïques (Cf I.1.1.i). Les contraintes tectoniques et les climats chauds du début du Cénozoïque ont participé à la karstification de cette plateforme, influant ainsi sur le réseau hydrique de surface, rare, des basses-terres. Depuis le début de l'Oligocène, les basses-terres guatémaltèques sont recouvertes par une forêt tropicale qui correspond à la majeure partie du département du Petén. Cette forêt dense est accompagnée d'une faune tropicale semblable à celle que l'on trouve en Amazonie depuis le début de l'Holocène, c'est-à-dire rare en animaux de grande taille.

L'ensemble de ces paramètres biogéographiques ont été déterminants dans l'histoire des sociétés mayas, tant pour la gestion des ressources hydriques en milieu tropical que pour les questions de soutenabilité alimentaire et d'agriculture en zone de forêt tropicale. Le traitement de l'histoire environnementale des basses-terres des 3500 dernières années passe également par une description des paramètres environnementaux actuels des basses-terres tropicales que forme le Petén.

i). Tropicalité et climat dans les basses-terres mayas

Le régime climatique des basses-terres répond à plusieurs facteurs géologiques et géographiques. Situées entre 16° et 18° de latitude nord, les basses-terres appartiennent aux latitudes intertropicales, ou basses-latitudes. Cette position géographique implique une insolation excédentaire et peu soumise aux variations saisonnières (Demangeot, 1999). Ainsi, les températures des basses-terres de la péninsule du Yucatán présentent une moyenne annuelle comprises entre 25°C et 26°C, pour des variations maximales supérieures à 20°C et s'étalant mensuellement entre 23°C et 28°C (Fig 1.5).

Les basses-terres se situent dans la zone climatique occidentale de la mer des Caraïbes qui est influencée par de nombreux mécanismes climatiques atmosphériques et océaniques (Hidalgo et al., 2015 ; Martinez et al., 2019). La mer des Caraïbes est traversée par un courant chaud de surface, le courant des Caraïbes (CC), formé par la réunion partielle du courant Nord-équatorial (NEC) et celui des Antilles (AC), qui arrosent toute l'année la côte est de la péninsule du Yucatán (Wu et al., 2017) (Fig 1.6). Malgré la présence de ce courant de surface, la température des eaux de surface est amplement dépendante des phénomènes climatiques saisonniers de l'atmosphère. Ceux-ci sont annuellement contrôlés par la position de l'anticyclone Nord-Atlantique (NASH) et de l'anticyclone Nord-Américain (continental), celle de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ITCZ) Est-Pacifique et Atlantique et les vents qui sont associés à ces dynamiques comme le Caribbean Low level Jet (CLLJ). Ce sont aussi ces interactions climatiques qui vont contraindre la cyclicité des précipitations sur la zone climatique Ouest-Caribéenne, c'est-à-dire la péninsule du Yucatán (Hastenrath, 1976 ; Hidalgo et al., 2015).

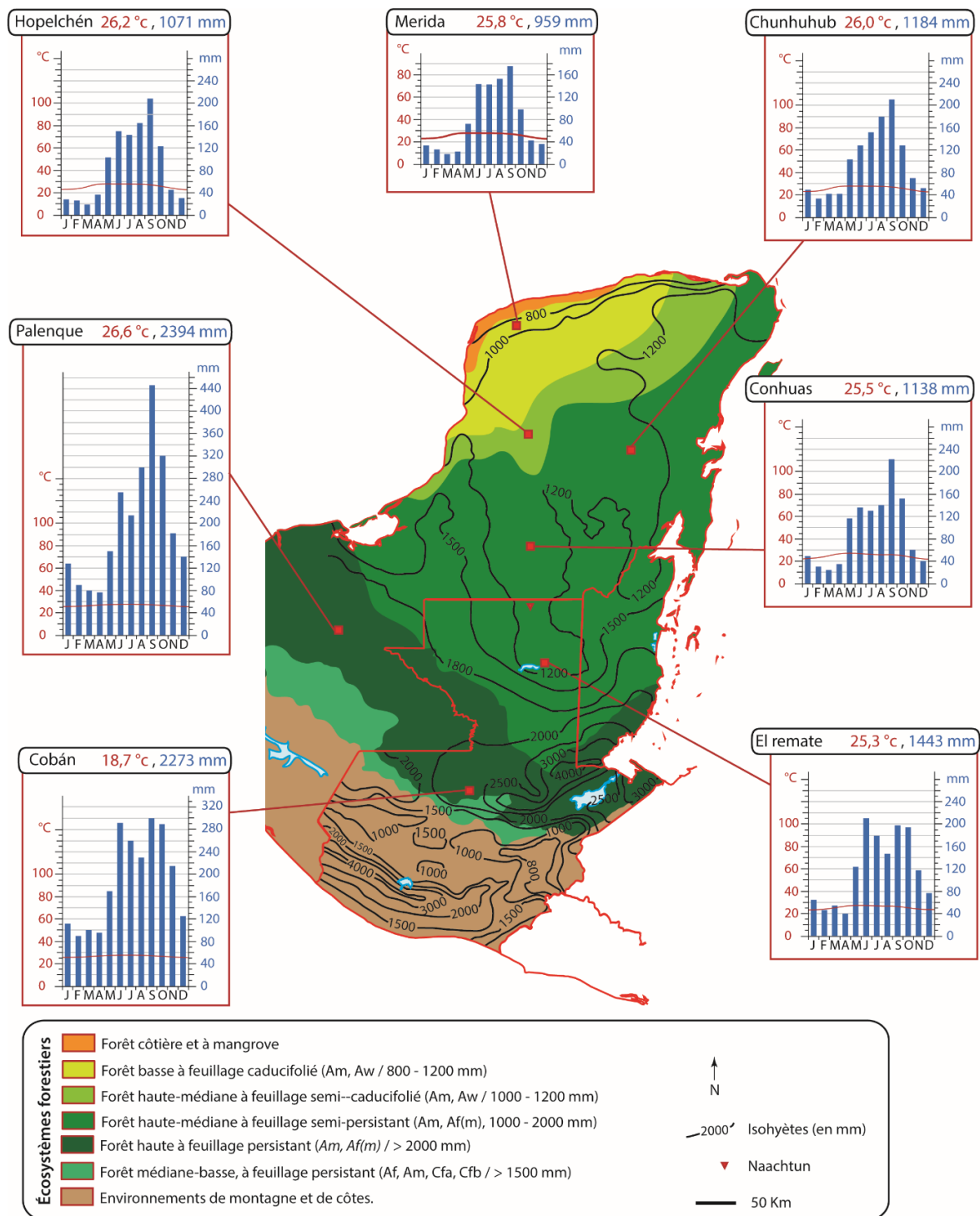


Figure 1.5 – Répartition géographique des biomes forestiers en fonction des isohyètes à l'échelle des basses-terres de la péninsule du Yucatán (modifié d'après Pennington et Sarukhan, 2005 ; Villar-Anléu, 2008 et la Comisión Nacional para la Conservación de la Biodiversidad – CONABIO). Positionnement latitudinal de diagrammes ombrothermiques illustrant le gradient Nord-Sud de pluviométrie.

On peut séparer une année climatique de la zone maya en 4 principales périodes. De mi-novembre à mi-avril, les anticyclones Nord-Atlantique et Nord-américain fusionnent (Fig 1.6) et vont migrer vers le sud à mesure que l'ITCZ Atlantique dérive elle aussi vers le sud (Martinez, et al., 2019). Ainsi, les précipitations sont plutôt localisées sur l'Amérique du Sud, tandis que le Caribbean Low level Jet semble jouer un rôle dans le transport des précipitations hors de la

zone ouest-Caraïbe (Durán-Quesada et al., 2010 ; Hidalgo et al., 2015). Il en résulte une période de précipitations minimales sur toutes les basses-terres du Yucatán (Fig 1.5).

De mi-avril à fin juin, l'anticyclone nord-américain va se dissiper provoquant ainsi une remontée de l'ITCZ et une diminution du CLLJ, dans le même temps que la mise en place d'un phénomène bassin d'eau chaude dans la mer des Caraïbes (Fig 1.6). Ces eaux chaudes de surface vont favoriser la convergence de l'humidité venue de l'ITCZ sur la zone ouest Caraïbes (Martinez et al., 2019). Ces phénomènes correspondent à la première période pluvieuse sur la zone maya, période où les précipitations vont être de plus en plus importantes (Fig 1.5).

Les diagrammes ombrothermiques des basses-terres mayas présentent une période de diminution des précipitations au cours des mois de Juillet-Août (Fig 1.5) qui porte le nom de sécheresse mi-estivale (*Mid Summer Drought* ; Magaña et al., 1999). Ce phénomène est provoqué par une extension à l'ouest de l'anticyclone de l'Atlantique nord dans le même temps qu'une réactivation du CLLJ et d'une remontée de l'ITCZ Pacifique (Hidalgo et al., 2015 ; Martinez et al., 2019). Toutefois, il s'agit tout de même d'une période où les précipitations sont bien plus importantes que pendant la saison sèche de l'hiver (Fig 1.5).

A partir de septembre, l'anticyclone de l'Atlantique nord se contracte et migre vers l'est et le sud-est entraînant avec une lui une migration vers le sud et l'est de l'ITCZ Pacifique (Fig 1.5 ; Martinez et al., 2019). Le bassin d'eau chaude s'est largement élargi à la côte Pacifique et occupe toute la mer Caraïbe tandis que le CLLJ disparaît de la région. Dans le même temps, l'ITCZ Atlantique a atteint ses plus hautes latitudes dans les petites Antilles (Hastenrath, 1976 ; Martinez et al., 2019). Il s'agit alors de la période où les précipitations vont être maximales sur la péninsule du Yucatán (Fig 1.5). Toutefois, cette contraction de l'anticyclone vers l'Ouest va commencer à attirer un retour de l'anticyclone de l'Amérique du Nord amenant un retour aux conditions climatologiques de la période sèche dès la mi-novembre.

Toutefois, ces précipitations ne sont pas homogènes dans l'espace des basses-terres, et leur distribution définit trois grandes zonations géographiques (Sharer et Traxler, 2006). Ces zonations géographiques sont, également à mettre au regard de la végétation, elle-même contrainte par les variations de précipitation (Fig 1.5 ; voir la sous partie suivante). Ainsi, la zone au nord du *rio Polochic* (Fig 1.1) est considérée comme une phase de transition des reliefs et de la géologie. Cette zone, considérée comme les basses-terres méridionales, est marquée par de fortes précipitations annuelles (2000 – 3000 mm, Sharer et Traxler, 2006), qui, en lien avec un substratum déformé et métamorphisé, permettent l'affleurement de nombreux cours d'eau en surface. Au nord de cette zone, la plateforme du Petén forme les basses-terres centrales. Les précipitations annuelles qui y sont enregistrées, oscillent entre 2000 et 1 000 mm (Hodell et al, 2005 ; Fig 1.5). Ces conditions nous permettent de classer le Petén dans un régime climatique de type Af à Am selon la classification de Köppen, c'est-à-dire un climat de type tropical humide (Kottek et al., 2006). Au nord de la frontière Mexique/Guatemala s'étalent les basses-terres septentrionales (Sharer et Traxler, 2006) marquées par des précipitations annuelles moins importantes, entre 500 et 1500 mm, et qui décroissent vers le

nord de la péninsule (Hodell et al, 2005).

Cette disparité des précipitations s'exprime également à une échelle temporelle. L'Amérique centrale se trouve à la « réunion » entre deux systèmes de variations du régime océan-atmosphère que sont l'Oscillation Nord-Atlantique (la NAO) et l'Oscillation Australe – El Niño (ENSO). Si l'ENSO est plus connue pour ses impacts sur la côte pacifique de l'Amérique du Sud, elle touche également l'Amérique centrale en interagissant, en phase ou en décalage, avec la NAO (Giannini et al., 2001 ; Wahl et al., 2014). Ce qui ressort des modèles climatiques, c'est que lors de l'année d'un épisode El Niño, les conditions estivales sont plus sèches que la normale (Giannini et al., 2001). À la suite d'un épisode El Niño, les conditions de printemps, c'est-à-dire la saison sèche, vont se faire plus humides que la normale. Cette augmentation des précipitations semble s'accroître lors du retrait tardif de l'anticyclone Nord-Atlantique forcé par un événement positif de la NAO (Giannini et al., 2001 ; Bravo-Cabrera et al., 2017).

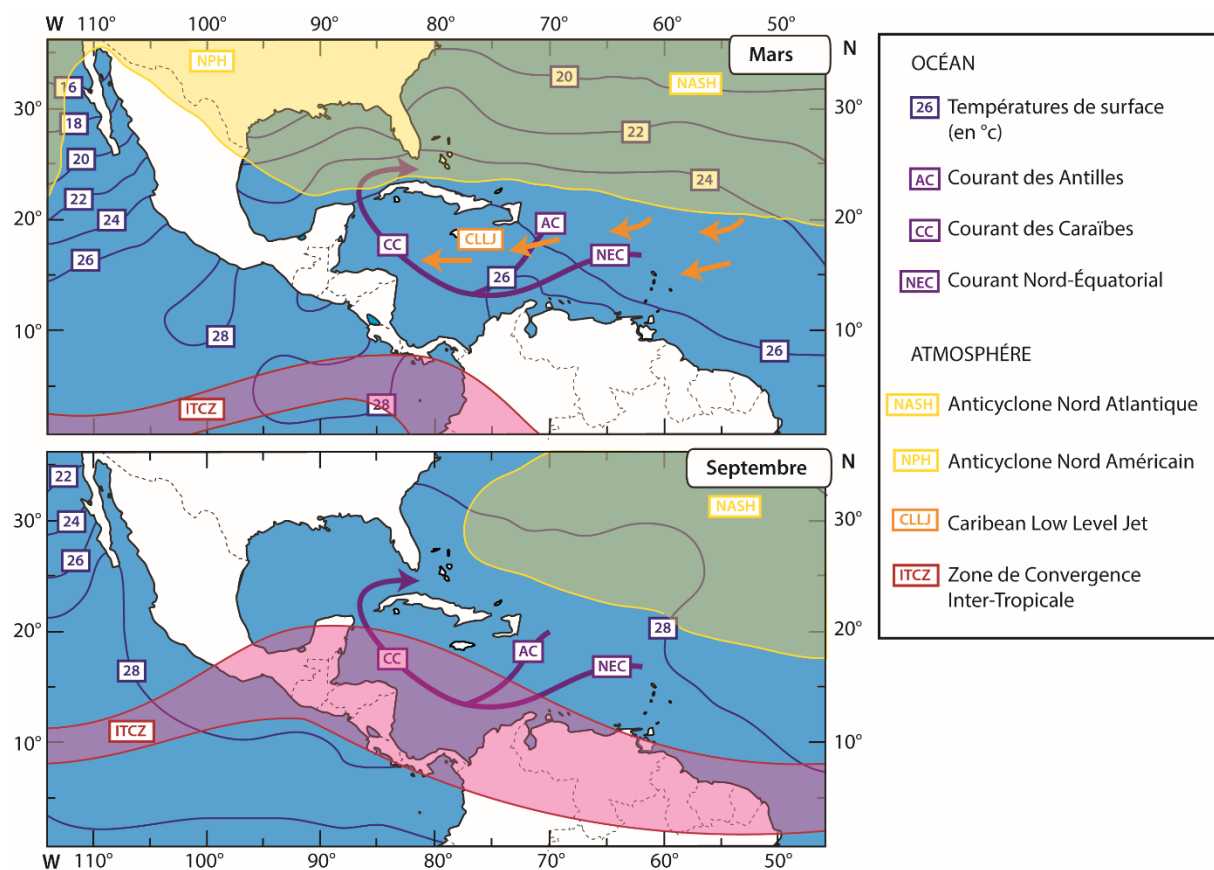


Figure 1.6 – Représentation simplifiée des processus d'interactions atmosphère-océan qui régissent la saisonnalité des précipitations dans les basses-terres mayas.

En fonction des années, et parfois associé à El Niño, un phénomène inverse de l'ENSO, La Niña, se produit. En général, les conditions sont inverses avec des précipitations plus importantes au cours de la saison sèche normale, et moins importantes au cours de la saison humide habituelle (Bravo-Cabrera et al., 2017). Il est à noter que la durée des phénomènes liés à l'ENSO sont assez instables dans le temps et ne sont pas liés. Ainsi, la durée et le nombre d'événements d'El Niño et de La Niña sont différents depuis leurs mesures (Grimm et al.,

2000). De plus, le couplage ou le découplage des épisodes de l'ENSO avec ceux de la NAO amplifie ou tempère les réactions climatiques observées en fonction des décennies (Giannini et al., 2001). Si ces cycles et interactions atmosphères-océans sont encore mal compris, il est certains qu'ils ont joué et jouent encore un rôle dans la répartition interannuelle et irrégulière des précipitations sur les basses-terres mayas. Ces cycles ont eu et continuent d'avoir des effets sur les pratiques humaines, notamment l'agriculture (Kennett et al., 2012 ; Wahl et al., 2014 ; Douglas et al., 2016). Pour exemple, sur la dernière décennie, trois sécheresses historiques – les plus importantes depuis 30 ans – imputées à El Niño ont été enregistrées au Guatemala (2009, 2016, 2019), provoquant des pénuries alimentaires régionales.

ii). Des sols et de l'eau dans les basses-terres mayas

On l'a vu, les basses-terres mayas constituent une plateforme carbonatée étendue et karstique. Toutefois, des régions géomorphologiques plus fines peuvent être définies (Dunning et al., 1998). Le transect de la figure 1.7 (1) montre que la région de Naachtun correspond à la partie méridionale de l'EIR (Elevated Interior Region), nommée Plateau central du Petén, qui s'étend de Tikal à Calakmul (Dunning et al., 2012). Cette région présente un paysage de collines dont certains reliefs escarpés peuvent atteindre une centaine de mètres, amplifiés par des mouvements tectoniques normaux (Figure 1.7 ; Marshall et al., 2007). Le drainage de surface est peu développé et la nappe phréatique permanente se trouve bien en dessous de la surface (Fig 1.7).

Le paysage géomorphologique est marqué par des structures karstiques de dissolutions et d'infiltrations, qui, en surface, prennent la forme de grandes dépressions de type *poljé*, qui portent le nom de « *bajo* » (Dunning et al., 1998 ; Marshall et al., 2007). Ces *bajo* prennent souvent la forme de marais qui sont inondés pendant la saison des pluies, et qui peuvent conserver en saison sèche, des plans d'eau résiduels (*Sival*), et plus rarement une large étendue d'eau (*laguna*) (Fig 1.7). Carozza et al. (2007) considèrent que ces zones sont généralement endoréiques, et s'étonnent que l'eau soit au final un élément omniprésent de ces paysages karstiques. Il semble toutefois, qu'en fonction des sites étudiés, les sociétés mayas avaient besoin de recueillir et de stocker l'eau, voire de modifier le paysage des zones humides à des fins hydrauliques (Dunning et al., 1998).

Sur les zones hautes, les sols, de type rendosol, sont en général peu épais (jusqu'à 50cm) et se développent sur des substrats calcaires (Beach et al., 2008). Ce sont les mêmes sols qui se développent sur les pentes des *bajo*, mais ils sont en général plus fins. L'érosion et le drainage des escarpements vers les *bajo* entraînent la présence de sols différents dans les zones basses. Ces sols, de séquences vertisols-histosols, sont plus profonds et majoritairement composés d'argiles (Beach et al., 2008). Ainsi, localisés dans des zones plutôt humides, ces sols sont assez sensibles aux variations de structures (Castanet et al., 2016). Dunning et al. (1998) rapportent que les sols de *bajo* ont largement été utilisés à des fins agricoles dans la région du Petén au cours de l'occupation maya.

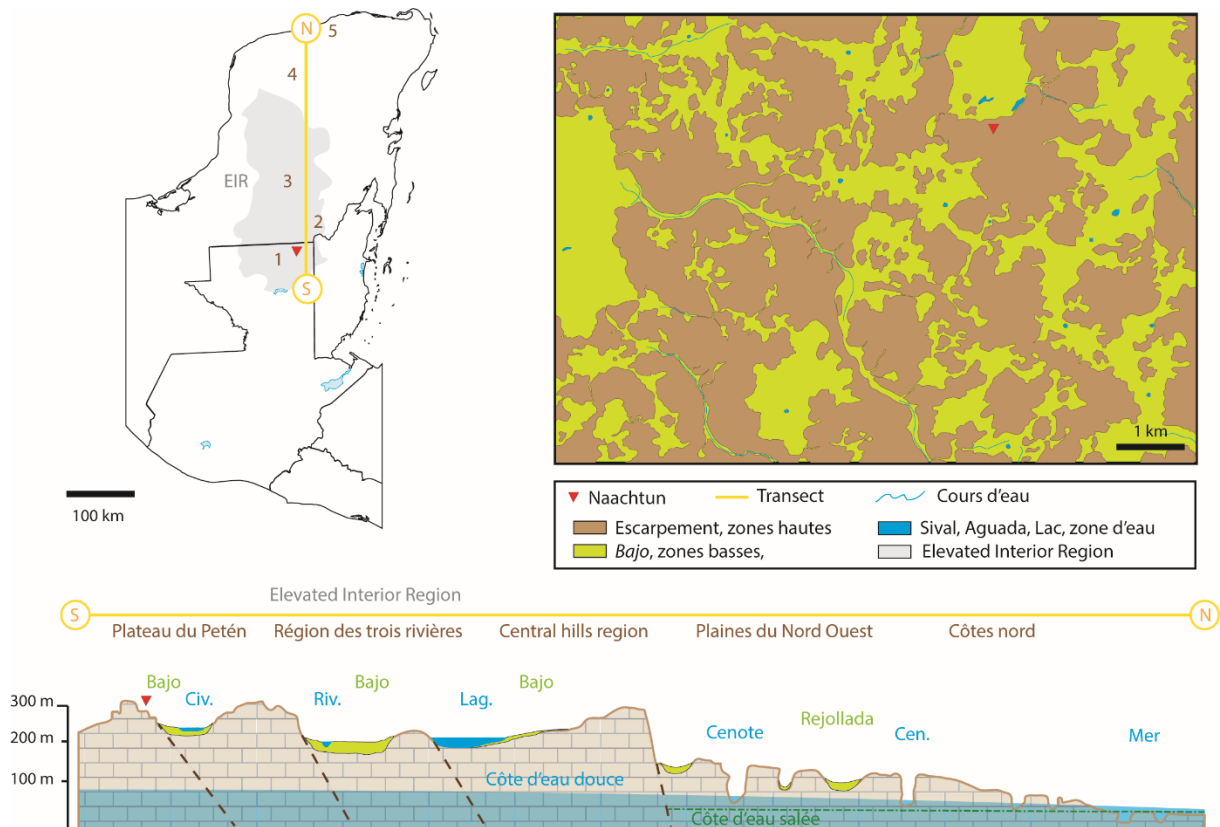


Figure 1.7 – Présentation de différentes sous-régions des basses-terres mayas (1. Plateau karstique du Petén, 2. Région des trois rivières, 3. Région des central hills, 4. Plaines du Nord-Ouest, 5. Côtes Nord) et implications géomorphologiques sous forme d'un transect de ces régions (modifié d'après Beach et al., 2016) et d'un grossissement sur la région de Naachtun.

Sur la marge est de l'EIR (Fig 1.7 - 2), à une cinquantaine de kilomètres de Naachtun, se trouve la région des trois rivières. Cette région forme une transition avec les zones escarpées vers la côte bélizéenne, qui se traduit par la résurgence des eaux infiltrées dans le réseau karstique. Il s'agit donc d'une zone relativement humide, arrosée par de nombreux cours d'eau (Dunning et al., 1998). Il y a de nombreux sites archéologiques mayas dans la région, et Dunning et al (1998) rapportent une nouvelle fois des traces d'adaptation et de pratiques humaines dans les zones humides.

La portion septentrionale de l'EIR au nord de Naachtun (Fig 1.7 - 3) est en continuité avec le plateau karstique du Petén. Il s'agit d'une région karstique avec de nombreux escarpements tectoniques où le drainage est majoritairement souterrain ou en partie redirigé vers les zones dépressionnaires (Dunning et al., 1998 ; Marshall et al., 2007). Comme dans le cas du plateau du Petén, les sols sont peu épais, mais sont occupés par une plus dense activité agricole moderne, preuve de fertilité pour Dunning et al. (1998). Cette région marque également la fin de l'EIR avec la faille de Ticul et son relief de collines éponymes, qui surplombe de 50 mètres d'altitude les zones de plaines du Yucatán (Marshall et al., 2007).

Le tiers nord de la péninsule du Yucatán (Fig 1.7 - 4) est constitué d'une plaine karstique d'altitude plus faible que l'EIR (Fig 1.7) et avec peu de relief. La région est caractérisée par l'absence totale d'un réseau hydrologique de surface qui s'explique par un maillage dense de

dolines et de *Cenote* (sorte de puits naturel) qui forment le seul accès à l'eau, souterrain donc, de la région (Dunning et al., 1998 ; Marshall et al., 2007). Les sols sont généralement très peu épais et plutôt pauvres (Dunning et al., 1998). Malgré ces conditions défavorables, cette région des basses-terres mayas a supporté des populations importantes, qui ont développé des stratégies agricoles (vergers, amendement, transport de sols) pour pallier ce déficit hydrique et pédologique (Dunning et al., 1998 ; Demarest, 2004).

Enfin, la région de la côte nord (Fig 1.7 – 5) correspond à la zone littorale et se caractérise par des plages, des lagunes, des estuaires et marécages et des zones de savanes périodiquement inondées (Dunning et al., 1998). Ces conditions marines impliquent une forte salinité des rares sols, réduisant ainsi le potentiel agricole de cette zone.

iii). Des forêts tropicales et des basses-terres

Les premières études scientifiques et botaniques menées sur les forêts des basses-terres datent des années 30 et ont amené à les classer comme des forêts tropicales humides, comparables à la forêt tropicale sud-américaine et ce malgré un climat précédemment défini comme variant au long des 4° de latitude des basses-terres de la péninsule du Yucatán.

Du sud au nord des basses-terres de la péninsule du Yucatán, en suivant la diminution graduelle des précipitations, on peut voir une organisation écologique de la forêt tropicale (Fig 1.5). Les basses-terres méridionales, fortement arrosées sur l'année, permettent la croissance d'une forêt tropicale humide luxuriante dite pluviale (Villar Anléu, 2008). Les basses-terres tropicales centrales, qui hébergent Naachtun et plus généralement la partie nord du Petén, sont en revanche recouvertes par une forêt tropicale semi-sempervirente (Lundell, 1937), définie aujourd'hui comme une *selva alta y medianasub-perennifolia* dans la classification de Pennington et Sarukhan (2005). Enfin, à mesure que l'on remonte vers le nord des basses terres septentrionales, la végétation va tendre vers des forêts plus sèches, typiques du nord de la péninsule, voire des zones de savanes boisées (Pennington et Sarukhán, 2005 ; Villar Anléu, 2008).

Cependant, cette classification écologique ne reflète pas toujours la diversité des écosystèmes forestiers que l'on trouve dans les différents contextes géomorphologiques des basses-terres centrales. On divise, généralement, les environnements végétaux du nord-Petén en deux types, forêts de collines et forêts de terres de marais (*bajo*) (Fig 1.8 ; Pennington et Sarukhán, 2005). Les zones de collines sont couvertes de hautes forêts semi-persistantes (30-40 m), assez denses (Fig 1.8), qui correspondent au type régional de la forêt. Les arbres larges, caractéristiques de ces forêts, appartiennent principalement aux familles des Burseraceae, Fabaceae, Meliaceae, Moraceae, Sapindaceae et Sapotaceae. Les zones de *bajo* sont couvertes par une forêt basse (5-8 m) et relativement dense (Fig 1.8), où les associations végétales sont adaptées aux sols argileux et aux submersions saisonnières comme aux périodes de dessiccation. Pennington et Sarukhán (2005) définissent ces forêts comme *selva*

baja subperennifolia et considèrent qu'elles sont également caractéristiques des forêts locales de la région du Petén. Les associations végétales sont principalement composées d'espèces appartenant aux familles des Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae et Myrtaceae. En plus de ces deux principaux écosystèmes forestiers, il est possible de trouver d'autres types de végétation, comme des palmeraies, des pinèdes ou des savanes humides/sèches (Fig 1.8), qui se sont adaptés aux conditions géomorphologiques locales (Lundell, 1937 ; Schulze et Whitacre, 1999 ; Martínez et Galindo-Leal, 2002).

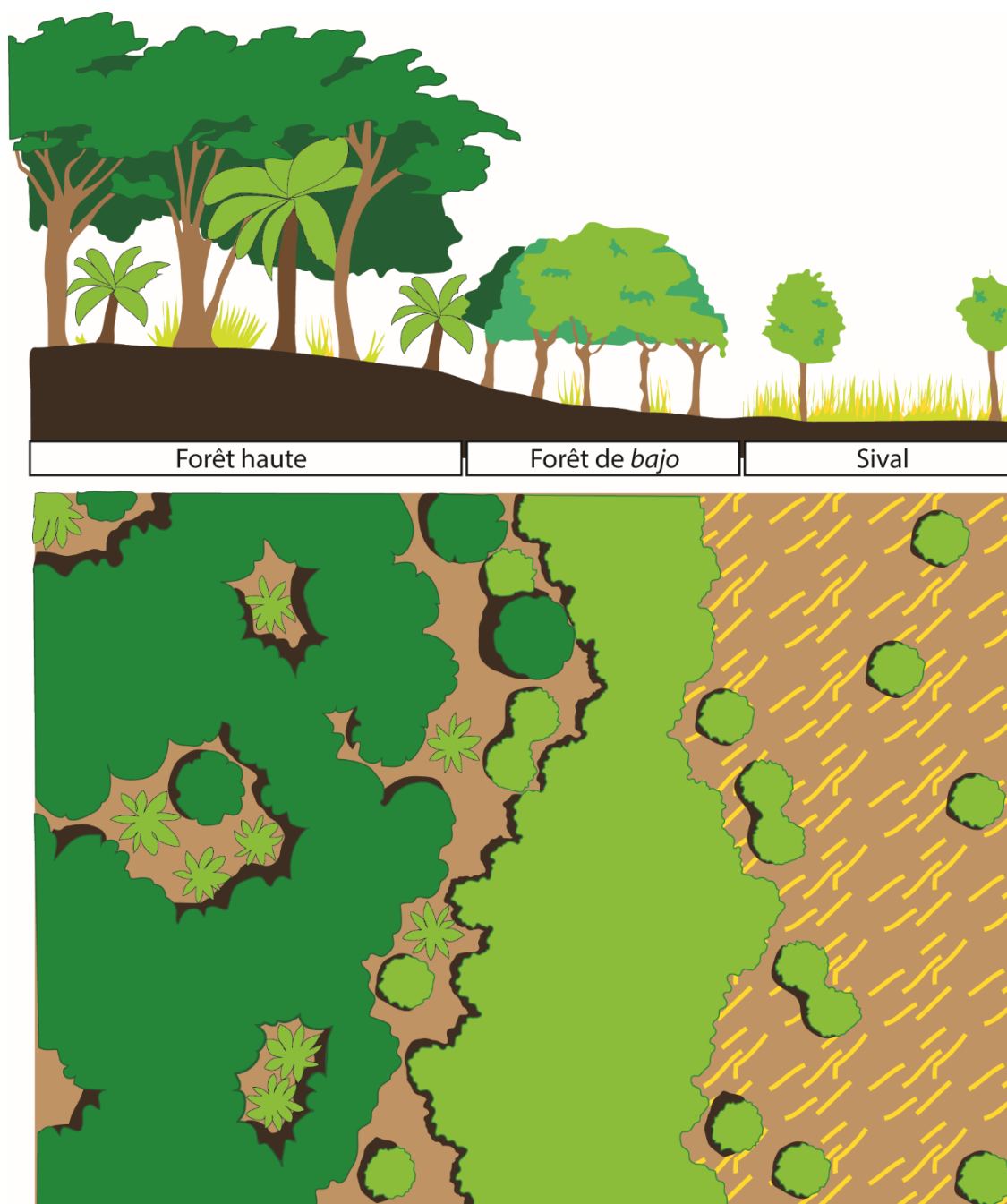


Figure 1.8 – Représentation schématique (en coupe et planaire) des trois principaux écosystèmes de la région du Petén. Il est possible d’y visualiser les différences de hauteurs de canopée mais également les différences dans le degré d’ouverture des écosystèmes (modifié d’après Jacob, 1995).

Une description des communautés végétales de Naachtun est disponible dans le chapitre 3.

Elle y décrit avec beaucoup plus de précisions les particularités écologiques des différents écosystèmes rencontrés sur le territoire du site.

II. Ère, Civilisation et Sociétés mayas

1. Les Mayas en Mésoamérique

i). Mosaïque culturelle et temporelle mésoaméricaine

Toute visite touristique en Amérique centrale intègre l'exploration d'un site archéologique ou d'un musée dédié aux découvertes archéologiques locales. Les sites de *San Lorenzo* (Mx) et de *La Venta* (Mx) et leurs têtes colossales, les *atlantes* et la pyramide de *Tula* (Mx), les ruines de *Tenochtitlan* (Mx), les pyramides des cités de *Tzintzuntzan* (Mx), *Teotihuacan* (Mx), *Monte Albán* (Mx), *Palenque* (Mx), *Chichen Itza* (Mx), *Calakmul* (Mx), *Tikal* (Gt), *El Mirador* (Gt), *Yaxhá* (Gt), *Copán* (Hd) ou encore le village enseveli de *Cerén* (Sv) ne représentent que la part célèbre mais infime de la richesse des témoignages archéologiques centraméricains.

Ces sites sont représentatifs de différentes sociétés et civilisations (Fig 1.9) qui ont été en interaction pendant au moins 3500 ans (Rice, 2015 ; Halperin, 2017 ; Baron, 2018 ; Pool et al., 2018) sur un territoire allant, au minimum, du centre-nord du désert du Mexique jusqu'à une frontière sud, allant de la côte pacifique costaricaine à la côte caraïbe du Honduras (Demarest, 2004). Cette zone géographique, appelée Mésoamérique (Kirchhoff, 1960), correspond à une aire culturelle, c'est-à-dire une zone géographique où les sociétés et civilisations partagent des caractères et pratiques communes (Kirchhoff, 1960 ; Helms, 1975). Ces caractères propres ont été peu débattus depuis les années 40 et Kirchhoff (Boehm de Lameiras, 1986) mais on y reconnaît toujours le jeu de balle, les cérémonies sacrificielles, les pyramides en gradins, les codex en écorce ou peau de daim et la culture du maïs, de la courge et du haricot (*milpa*).

Le milieu du XXème siècle marque également la mise en place d'une chronologie générale pour les études américanistes qui est toujours utilisée aujourd'hui (Willey et Phillips, 1958 ; Sharer et Traxler, 2006). Cette chronologie part des premières occupations humaines dans les Amériques que nous avons vues précédemment et est divisée jusqu'à l'époque actuelle en 5 périodes principales (Tab 1.1). Les premières traces de peuplement sont dispersées et disparates, conduisant à une chronologie assez vague. Ainsi avant 3500 BCE, les chronologies parlent d'une période paléo-indienne, rarement considérée dans les travaux qui traitent des civilisations de la Mésoamérique. Les premières traces d'agriculture (Roush, 1997 ; Goman et Byrne, 1998 ; Piperno et Flannery, 2001) tout comme les premières céramiques (Brush, 1965 ; MacNeish et al., 1970 ; Hoopes, 1994) remontent à la période archaïque (Tab 1.1) qui s'étale au moins de 3500 à 2000 BCE (parfois 2500 BCE en fonction des chronologies) (Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006). Si cette date de 2500BCE atteste également des premières ouvertures du paysage par les Mayas (Islebe et al., 1996 ; Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2006), les traces d'habitats sont minimales, certainement associées à des matériaux légers et/ou périssables.

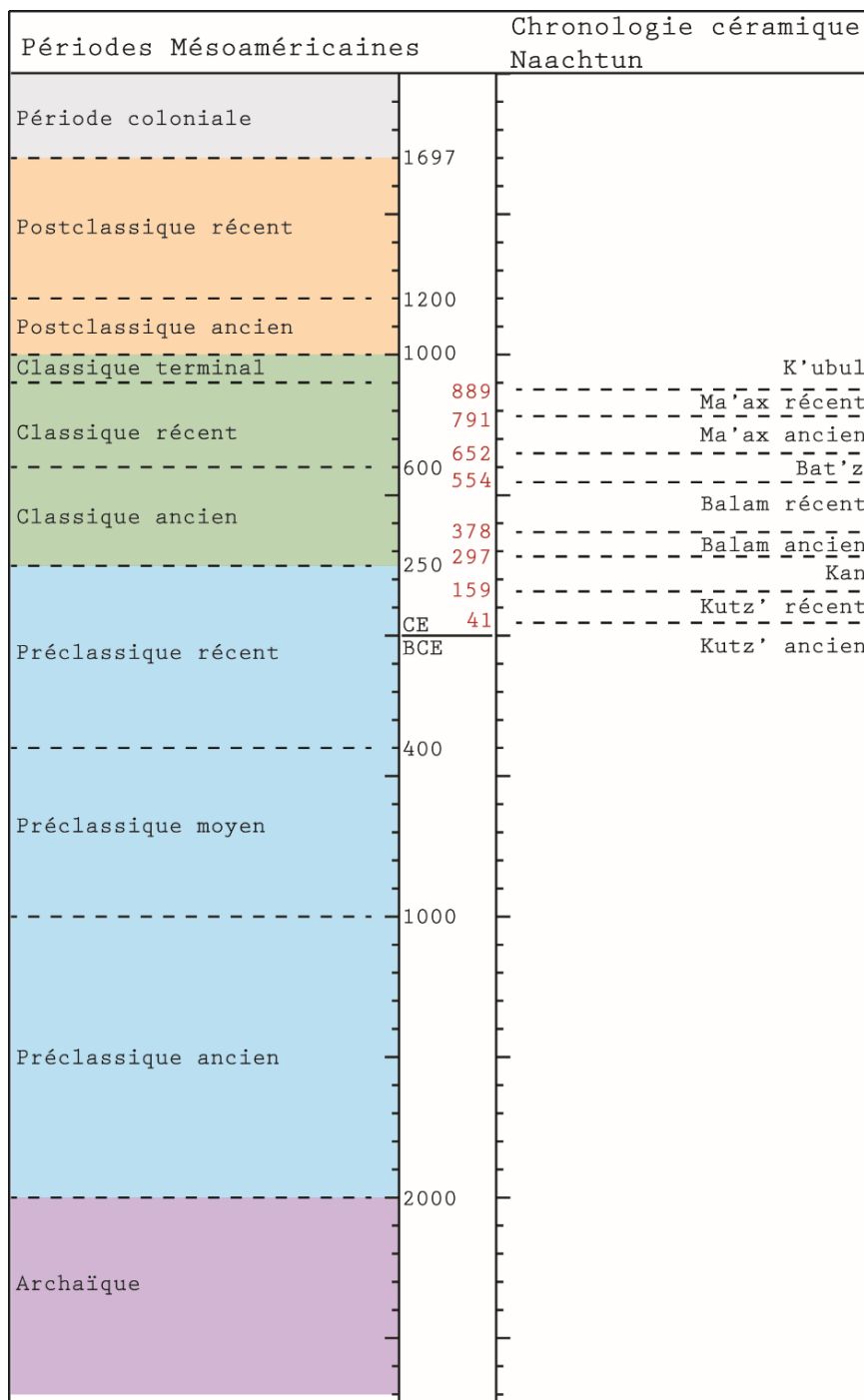


Tableau 1.1 – Représentation de la chronologie “orthodoxe” de la Mésoamérique en comparaison avec la chronologie céramique du site de Naachtun (modifié d’après Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006 et Hiquet, 2019).

Sharer et Traxler (2006) considèrent que les pratiques agricoles diversifiées et les céramiques sont bien implantées dans le monde mésoaméricain, particulièrement chez les Mayas, à partir de 2500 – 2000 BCE, marquant ainsi l’entrée dans la période Préclassique. Cette période Préclassique est généralement séparée en trois principales sous-périodes que sont le Préclassique ancien (2000 – 1000 BCE), le Préclassique moyen (1000 – 400 BCE) et le Préclassique récent (400 BCE – 250 CE). Hiquet (2019) considère que ces limites chronologiques ne marquent plus, au contraire de la biostratigraphie, des événements soudains et régionaux, mais une convention de langage. D’ailleurs, comme il est possible de

le voir sur le tableau 1.1, la chronologie céramique de Naachtun est dissociée de la chronologie traditionnelle.

Les premières apparitions d'architectures civiles ne sont datées que du milieu du II^{ème} millénaire BCE (Fig 1.9) sur la côte du golfe du Mexique (Mx) et appartiennent à la civilisation olmèque (Coe et al., 1967 ; Rust et Sharer, 1988 ; Clark et Doniz, 1994). Cette civilisation est remarquable par son architecture, son art ou encore ses gigantesques têtes sculptées en basalte (Coe, 1965). Si le centre de développement des olmèques est localisé sur le golfe du Mexique avec des sites comme *La Venta*, *San Lorenzo* ou encore *Tres Zapotes* (Fig 1.10), leur culture a influencé les civilisations centraméricaines et notamment les premières sociétés mayas (Quirarte, 1977 ; Andrew, 1987 ; Demarest, 1989). En zone maya, les premières constructions monumentales n'apparaissent qu'à partir du Préclassique moyen (Estrada-Belli, 2011). La période Préclassique marquerait donc en Mésoamérique le développement d'un système socio-politique complexe aux périphéries des basses-terres, avec une phase de transition au Préclassique moyen où s'observe l'apparition d'une domination régionale des basses-terres par les premières sociétés mayas (Fig 1.9).

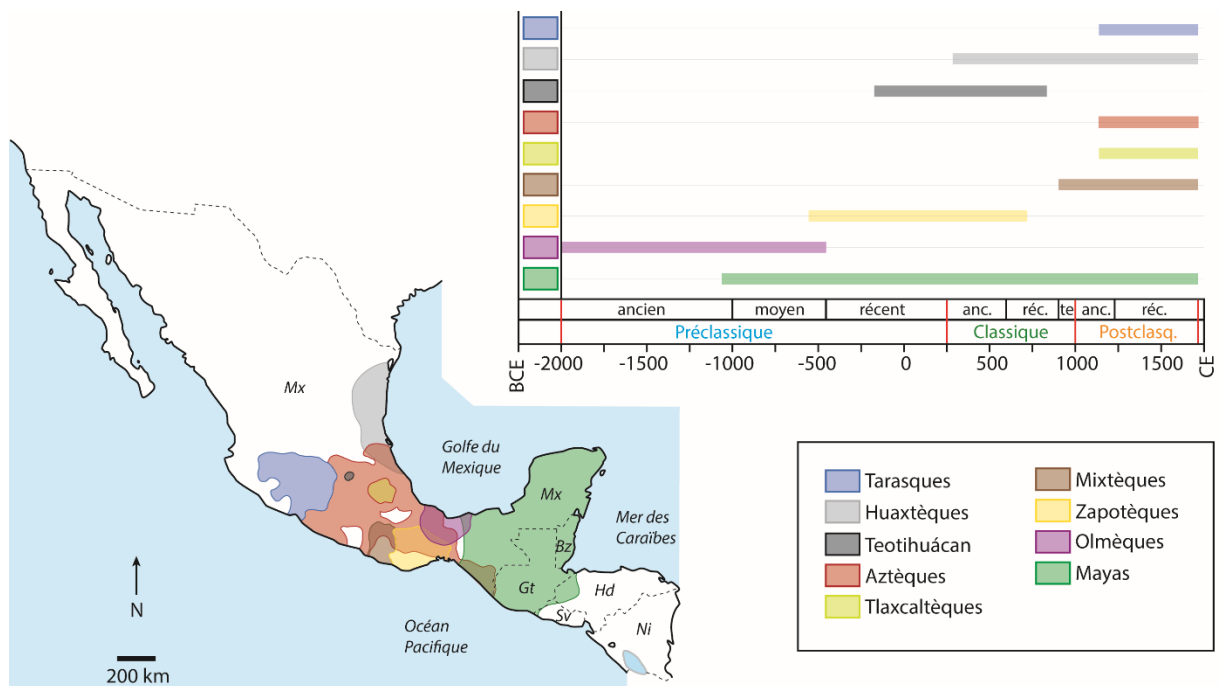


Figure 1.9 – Répartitions géographiques et temporelles approximatives de certaines civilisations mésoaméricaines sur une période de -2000 BCE à 1750 CE (d'après Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006). anc. = ancien, réc. = récent, te. = terminal. ; Bz = Belize, Gt = Guatemala, Hd = Honduras, Mx = Mexique, Ni = Nicaragua.

En effet, la culture maya semble, dans les premiers temps du Préclassique, évoluer sur la frange pacifique-hautes-terres en concomitance avec les cultures Olmèque ou Izapan comme le montre la présence de sites mésoaméricains Préclassiques associés à différentes cultures (Fig 1.10 – *Izapa*, *Abaj Takalik*, *La Blanca*, *El Baul*, *Monte Alto*, *Kaminaljuyú*). Toutefois, si les sociétés mayas ont été en interaction continue avec ces sociétés mésoaméricaines, et avec d'autres sociétés mésoaméricaines par la suite (Fig 1.9), elles possèdent une histoire propre

qui sera traitée dans les deux prochaines sous-parties.



Figure 1.10 – Distribution géographique et temporelle des principaux sites archéologiques maya superposées aux grandes régions d'occupation maya (modifié d'après Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006). anc. = ancien, te. = terminal.

Pour l'heure, il n'est pas possible de poursuivre cette histoire maya sans terminer la présentation du cadre temporel de celle-ci. En effet, nous verrons par la suite que si le Préclassique est une période importante pour la mise en place de la civilisation, son apogée culturelle prend place au cours de ce qu'on appelle la période Classique (Tab 1.1). Cette période de temps commence à la sortie de la crise régionale du Préclassique récent (150-200 CE) et va s'étaler jusqu'à une autre période de crise régionale vers 1000 CE. Ce millénaire est, en général, séparé en trois périodes : le Classique ancien de 250 à 600 CE, le Classique récent de 600 à 900 BCE, et enfin le Classique terminal, correspondant à la période de crise citée ci-avant, de 900 à 1000 CE. Dans les basses-terres du Petén, le Classique terminal marque l'abandon de la région par une portion importante de la population maya. La période suivante correspond à celle du Postclassique, divisée entre le Postclassique ancien (1000 – 1200 BCE) et le Postclassique récent (1200 – 1697 BCE). Cette époque marque l'installation de grands sites de pouvoir dans les plaines nord du Yucatán mais également la période de contact avec

les espagnols. 1697 CE correspond à la chute de la dernière cité maya au centre du Petén, marquant ainsi la fin de l'ère maya et concluant notre chronologie avec l'entrée dans la période coloniale.

ii). La civilisation maya et ses « Berceaux »

L'observation sur une carte actuelle de la localisation des sites Préclassiques mayas laisse entrevoir une dispersion homogène de ces sites entre les grands contextes géographiques de l'aire maya (Fig 1.8). Pourtant, jusqu'aux années 1950, la majorité des données et traces archéologiques datant du Préclassique étaient concentrées dans les hautes-terres (Estrada-Belli, 2011). Des grandes cités comme *Kaminaljuyú*, *Balberta*, *Ujuxte* (Gt) ou *Chajchuapa* (Sv) montraient une architecture civile et monumentale, et par la suite, une organisation agraire et des échanges économiques (Demarest, 2004).

A l'inverse, avant les premières fouilles des années 30 dans les basses-terres, les traces d'occupation humaine étaient rares. Cela a favorisé l'émergence d'une histoire géographique où les Mayas Préclassiques de la côte pacifique et des hautes-terres ont « colonisé » par la suite, au Classique, les basses-terres (Spinden, 1928 ; Andrews et Hammond, 1990), voire ont servi d'intermédiaires entre les Olmèques et les Mayas des basses-terres (Lowe, 1981). Les travaux sur les Olmèques du golfe du Mexique ont également posé l'hypothèse que les Mayas des basses-terres, comme la plupart des sociétés mésoaméricaines, étaient originaires d'une « culture mère » localisée dans cette zone du golfe du Mexique, et donc très certainement les Olmèques eux-mêmes (Estrada-Belli, 2011).



Figure 1.11 – Photo de la mise à jour du premier bâtiment maya préclassique à Uaxactun en 1927 (à gauche) et 1928 (à droite), on peut remarquer la présence des masques en stuc sur la structure E-VII (d'après Black, 1990).

Les premières fouilles de la Carnegie institution à *Uaxactún* (Gt) dans les années 30 ont permis de mettre en avant des structures et monuments Préclassiques (Fig 1.11 - Ricketson, 1933 ; Black, 1990) et faire ainsi remonter l'histoire des Mayas des basses-terres avant la période classique. Des cortèges céramiques particuliers (Rice et Rice, 1980 ; Estrada-Belli, 2011), dont les rares datations radiocarbones réévaluées confirment l'attribution à la période Préclassique

moyenne (Clark et Cheetham, 2002), ont également participé à ce retour dans le passé maya Préclassique des basses-terres. Ils ont longtemps constitué les meilleures preuves archéologiques de la présence d'habitants dans les basses-terres mayas autour de 1000 BCE, à un moment où aucun vestige architectural Préclassique n'avait encore été mis à jour, comme à *Tikal*, *Holmul* ou encore *Cival* (Estrada-Belli, 2011). Demarest (2004) et Estrada-Belli (2011) rapportent que la tradition céramique des basses-terres était en place au moins à partir du Préclassique moyen, conservant un style plus stable que les céramiques des hautes-terres et du Pacifique, ce qui permet aux mayanistes de poser l'hypothèse d'une unité régionale dès cette période.

Après les années 50, de nombreux programmes de fouilles archéologiques ont été lancés dans les basses-terres mayas et ont permis la collecte de données sur le Préclassique. Parmi les sites visés par ces programmes, on peut citer *Calakmul*, *Cerros*, *Cuelo*, *El Mirador*, *Nakbe*, *Seibal*, *Tikal*, *Tintal* et *Uaxactún* (Fig 1.10 - Coe, 1962 ; Sablof et al., 1975 ; Scarborough et al., 1982 ; Hansen, 1984 , 1991 ; Folan, 1992). Pour la plupart de ces sites, des structures architecturales de grandes tailles sont datées autour de 500 CE (exemple du temple tripartite *El Tigre* du site *El Mirador*). On y trouve une occupation d'un espace « urbain », tout comme des chaussées partant vers d'autres sites (Dahlin, 1984, Folan, 1992). Hansen (2005) indique que *Nakbe* dans un premier temps, mais surtout *El Mirador* au Préclassique, ont atteint de telles dimensions qu'il est possible de parler « d'état maya » au Préclassique dans les basses-terres.

Enfin, quant à l'origine des populations mayas des basses-terres, des données complémentaires ont été apportées par l'étude des paléoenvironnements. Estrada-Delli (2011) rapporte qu'à la fin des années 60, les premières études palynologiques ont montré des traces de déforestation et d'agriculture du maïs datées à 2000 BCE. Ces premières datations, controversées, ont été par la suite confortées par de nouvelles découvertes paléoenvironnementales confirmant l'ancienneté de pratiques agraires dans le Petén et au Belize (Hammond et al., 1976 ; Jones, 1994 ; Pohl et al., 1996, Wahl et al., 2006). Si certaines dates ont été revues comme plus récentes au Belize (*Cuelo* – Andrews et Hammond, 1990), la découverte d'outils en pierre confirme l'ancienneté de l'occupation humaine au Belize (Clark et Cheetham, 2002 ; Lohse et al., 2006). Ces données laissent entendre que les basses-terres étaient déjà occupées par des communautés agricoles avant la période Préclassique.

iii). Les basses-terres mayas aux périodes Préclassique et Classique

Comme nous venons de le voir, les basses-terres sont occupées dès le début de la période préclassique et la présence de sites mayas est attestée au Préclassique moyen. Dès cette période, les sociétés mayas vont se développer dans les basses-terres centrales de telle manière que cette région va devenir un centre culturel et politique à la période classique. Dans un tel contexte, il est alors nécessaire de présenter les grandes phases historiques de ces trois millénaires dans l'optique d'étudier un site particulier.

Comme nous l'avons vu, *Nakbe* est la première cité avec une architecture civile à voir le jour dans les basses-terres centrales, autour de 600 BCE (Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006). Régionalement, la fin du Préclassique moyen - début du Préclassique récent est marquée par le développement d'ensemble architecturaux similaires à travers les basses-terres centrales, comme *Calakmul*, *Cerros*, *Cuelo*, *El Mirador*, *Seibal*, *Tikal*, *Tintal*, *Uaxactún*. Le Préclassique récent voit le développement des premières cités-états des basses-terres, dirigées par des « rois », dans le même temps qu'une période d'expansion démographique et de développement d'échanges politiques. Au cours de cette période, vers 350 BCE, *El Mirador* devient le plus grand site des basses-terres centrales et rivalise en taille avec les centres dominants des hautes-terres (*Kaminaljuyú*) ou des basses-terres septentrionales (*Dzibilchaltún*, *Komchén*), tout en centralisant les échanges commerciaux de sa région (Hansen, 2012).

Le passage du Préclassique au Classique, 200 CE, est marqué par la chute de centres politiques tels que *Nakbe*, *Seibal* et *Mirador* dans les basses-terres centrales (Wahl et al., 2007 ; Inomata et al., 2017) mais également *Cerros* au Belize ou *Komchén* dans le Yucatán (Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006 ; Martin et Grube, 2000). Ces déclin ou abandons de cités ne se sont pas généralisés puisque Demarest (2004) rapporte que d'autres cités du Petén comme *Tikal* ou *Calakmul* continuent de croître.

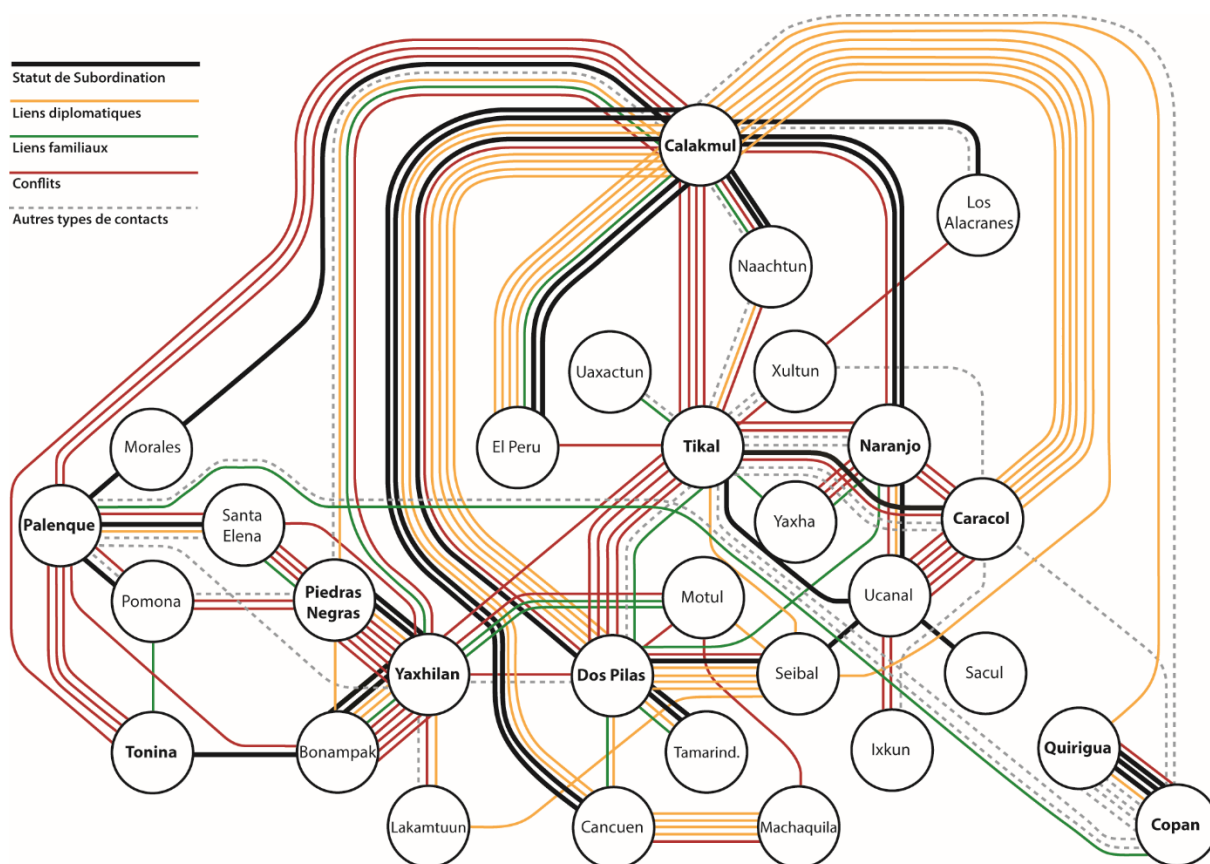


Figure 1.12 – Modèle des types interactions entre cités des Basses-terres centrales et méridionales à la période Classique (modifié d'après Martin et Grube, 2010).

La connaissance de l'histoire maya à la période Classique est facilitée par la multiplication d'inscriptions sur les édifices et monuments archéologiques. De cette manière, il a été établi que la période Classique correspondait à l'aboutissement du système politique de royauté des cités sous la forme d'un culte à un *K'uhul Ajaw*, un roi-sacré/divin (Demarest, 2004). Au début du Classique, *Tikal* domine politiquement les basses-terres centrales. Une inscription de *Tikal* indique qu'en 378 CE, un seigneur de *Teotihuacán* prend le pouvoir de la cité, influant ainsi sur les sphères politiques, culturelles et économiques des basses-terres centrales (Fig 1.12 - Martin et Grube, 2000). De par ce soutien mexicain, l'influence de *Tikal* se propage au Vème siècle sur une grande partie des basses-terres centrales et basses-terres méridionales et témoigne d'interactions (Fig 1.12) allant de l'alliance à la subordination des cités comme *Caracol*, *Rio Azul*, *Uaxactún* (Demarest, 2004). Des liens directs eurent également lieu entre *Teotihuacán* et d'autres cités mayas dans les basses-terres méridionales (*Copán*) ou les hautes-terres (*Kaminaljuyú*).

Les Vème et VIème siècles CE correspondent à une période d'augmentation de la population mayas des basses-terres et à une généralisation de la construction de monuments et d'édifices colossaux à travers la plupart des villes (Demarest, 2004 ; Sharer et Traxler, 2006). Au sud du Campeche, la cité de *Calakmul* commence à augmenter sa sphère d'influence sur les basses-terres centrales et prend possession de *Tikal* en 562 après un demi-siècle de conflit (Martin et Grube, 2000). Demarest (2004) propose que la désintégration de l'ensemble politique de *Tikal* ait conduit à la prolifération de royaumes mayas au Classique récent. *Tikal* reprendra le dessus sur *Calakmul* à la fin du VIIème siècle BCE à la faveur d'une nouvelle royauté (Martin et Grube, 2000). De nombreux sites du Petén vont profiter de ce renouveau, comme *Nakum*, *Uaxactún*, *Yaxhá* (Demarest, 2004). L'éclatement en de nombreux royaumes a favorisé leur développement concurrentiel sous la forme d'architectures monumentales, soutenu dans le même temps par une croissance démographique. Demarest (2004) rapporte de nombreux styles architecturaux à travers les basses-terres (au Belize, vallée de *Copán* et du rio *Motagua*, sur l'*Usumacinta*, la *Pasion*, au sud du Petén ou encore au Chiapas) en lien avec cette tendance. L'apogée architecturale de cette période est révélée par l'observation des données LiDARs des basses-terres centrales (Canuto et al., 2018).

Cette croissance économique et démographique va prendre fin sur une période d'un à deux siècles, au cours de ce qui forme le Classique terminal. En effet à cette époque, la plupart des sites des basses-terres centrales vont être abandonnés petit à petit (Demarest, 2004). Les causes de cet effondrement généralisé de la civilisation maya des basses-terres donnent lieu à de nombreuses hypothèses (Webster, 2002). Toutefois, les Xème et XIème siècles CE ne marquent le déclin de la civilisation maya que pour les cités des basses-terres centrales et des basses-terres méridionales, puisque de nombreux royaumes mayas continuent leur développement dans les hautes-terres, au Belize et surtout au Yucatán (Demarest, 2004). Le royaume *Itza* prend notamment une ampleur régionale avec le développement de sa capitale *Chichen Itza* et de son réseau commercial qui alimente notamment les « maisons-nobles » (remplaçante des *K'uhul Ajaw*) des basses-terres centrales. L'influence de *Chichen Itza* sur le

monde maya va peu à peu décliner au cours du XII^{ème} siècle, au profit de la cité de *Mayapán* qui exerçait son influence sur la région jusqu'à l'arrivée des espagnols au XVI^{ème} siècle. Les basses-terres méridionales et les basses-terres septentrionales sont respectivement soumises aux espagnols en 1527 et 1546 tandis que les sociétés mayas des basses-terres centrales, sous la protection de la forêt tropicale, ne se livreront qu'à la toute fin du XVII^{ème} siècle (Martin et Grube, 2000).



Point Tardigrade : Sourds

Lorsque les conquistadors espagnols posèrent pour la première fois le pied sur les sables du Yucatán, quelques autochtones vinrent à leur rencontre. A ce que raconte Fray Toribio de Benavente, les Espagnols leur demandèrent, en langue castillane :

- **Où sommes-nous ? Comment s'appelle cet endroit ?**

Et les autochtones répondirent, en langue maya yucatèque :

- **Tectecán, Tectecán.**

Les Espagnols comprirent :

- **Yucatán, Yucatán.**

Et depuis lors, c'est ainsi que s'appelle cette péninsule. Mais dans leur langue, les autochtones avaient dit :

- **Je ne te comprends pas, Je ne te comprends pas !**

Histoire contée par **Eduardo Galeano** en 2016 dans son ouvrage "El Cazador de historias".

2. Naachtun : La cité de la Pierre Lointaine

i). Histoire abrégée de ses découvertes

"We had stopped in a ramonal or grove of the breadnut tree, Brosimumalicastrum. The leaves of this tree are excellent forage, and the fruit attracts all kinds of game. [...] Groves of breadnut trees often contain Maya remains. Here was no exception, as I soon saw low mounds. Our camp was on high ground, and about one hundred yards south, I found there was a steep incline. I went straight up it, and discovered this was a natural acropolis, faced at the top by cut stones. I cut a path through the undergrowth in the semi-darkness of the forest and came to the base of a high mound. Going around it, I discovered the main plaza of another unknown First Empire city. It was almost dark, so I returned to camp, thrilled over the new discovery."

C'est en ces termes que Cyrus L. Lundell rapporte en 1932 sa découverte du 5 Janvier : une cité inconnue du Campeche (Mx) qu'il nomme *Nohoxna (An-entire-structure)*, située pour lui à une douzaine de kilomètres au nord de la frontière avec le Guatemala et dont il publie des plans partiels en 1933.

A proximité de ce premier site, une autre cité perdue se trouve à l'extrême nord du département du Petén (Gt), à 4km au sud de la frontière avec le Mexique. Elle est connue des *chicleros* au moins depuis 1916 et son signalement, sous le nom d'*El infierno*, par Alfonso Ovando (Morley, 1938). Le site est « découvert » et décrit partiellement pour la première fois en mai 1922 par Sylvanus G. Morley (Morley, 1938) dans le cadre de la sixième expédition de la Carnegie institution, sous le nom de *Naachtun* (de *Naach* = lointain et *tun* = pierre). C'est

lors de la seizième expédition de la Carnegie institution (1933), 11 ans plus tard, dirigée par Karl Ruppert, que les photos de monuments de *Naachtun* par John H. Denison vont permettre de lever le doute sur la synonymie de ces deux sites. Aujourd'hui, par principe de priorité, c'est le nom de Naachtun qui a été retenu (Morley, 1938), tout comme sa localisation au Guatemala a été confirmée (Fig 1.13).

Après cette première décennie de prospections et de descriptions archéologiques (1 plan toujours utilisé décrivant 19 monuments, 45 stèles, 9 autels), le site va peu à peu être « oublié » par les archéologues, voire être considéré comme un site mineur et ne plus apparaître sur certaines cartes.

Le site ne sera réétudié qu'à partir de 2004, lors d'un projet archéologique canadien mené par Kathryn Reese-Taylor, conduisant à la complétude de la carte de Ruppert et Denison et à la découverte de nouvelles stèles (Reese-Taylor et al., 2005). Cette campagne prend fin après une année de fouille.

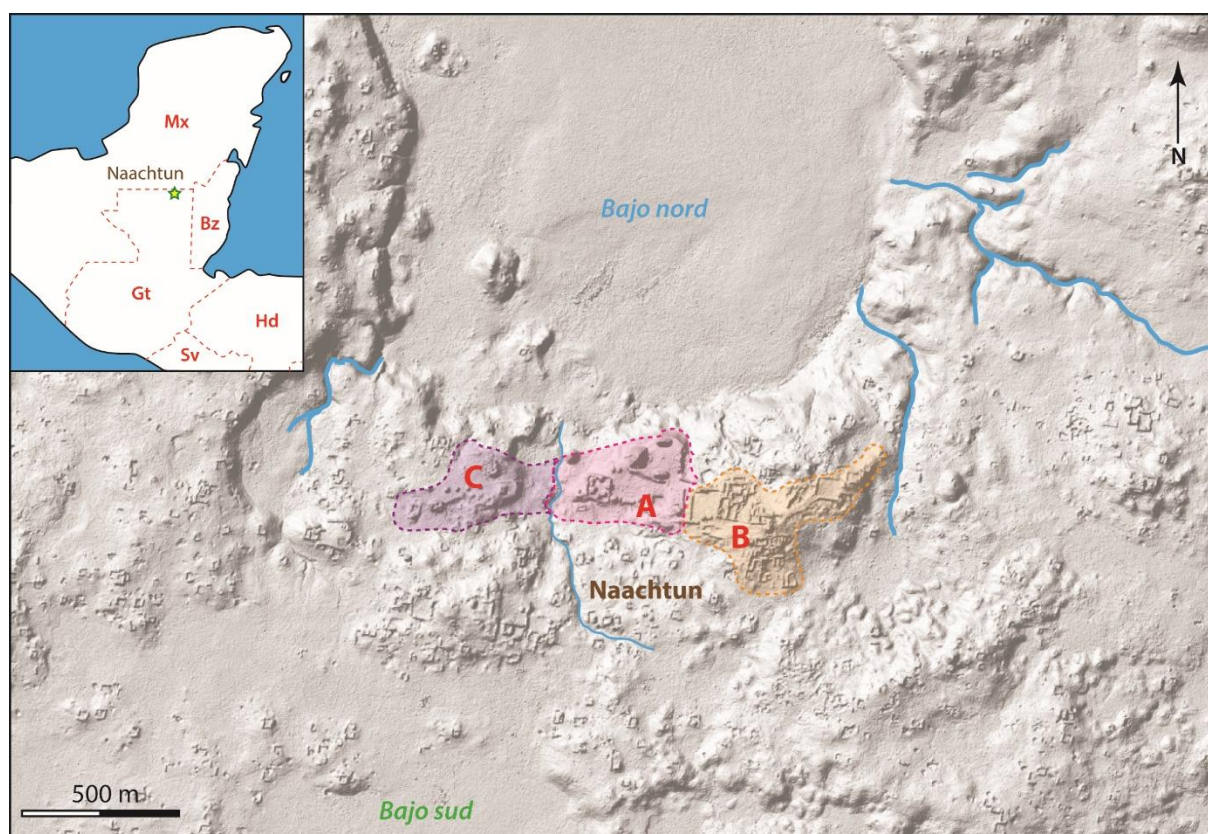


Figure 1.13 – Situation géographique et organisation spatiale du site archéologique de Naachtun d'après une image LIDAR (2017)

C'est en 2010 que débute le projet franco-guatémaltèque *Naachtun* dirigé par Philippe Nondédéo et Lilian Garrido (CNRS/Université Paris I Panthéon Sorbonne – Universidad San Carlos de Guatemala). Ce projet développe, depuis maintenant 9 campagnes de fouilles (2010-2014, 2014-2018), une approche pluridisciplinaire en regroupant des équipes d'archéologues et d'environnementalistes (Nondédéo et al., 2014 ; Nondédéo et al., 2015 ; Castanet et al., 2016). A ce jour, environ 200 Ha du site ont été étudiés, soit 150 Ha supplémentaires par

rapport aux anciennes prospections et l'obtention d'un visuel LiDAR (Fig 1.13) du site en 2017 a permis de préciser les observations faites depuis 2010 sur le site (Canuto et al., 2018).

ii). Structuration spatiale de la cité

Le site de Naachtun est enclavé au nord et au sud par deux zones de *bajo*, dont celui plus profond du nord abrite deux zones de *Sival*. L'alimentation en eau du *bajo* nord est assurée en saison des pluies par deux chenaux qui délimitent à l'ouest et à l'est le site (Fig 1.13). Le site de *Naachtun* s'étend selon un axe est-ouest sur deux collines séparées par un canal central (Fig 1.13) et peut être décomposé en trois grandes zones principales.

Naachtun se compose d'un épiscentre politique de 33 Ha, organisé selon trois groupes monumentaux, nommés, d'ouest en est, groupe C, groupe A et groupe B (Fig. 1.13 ; 1.14). Les groupes A et C représentent plutôt les édifices majeurs et cérémoniels avec un terrain de jeu de balles, une pyramide, des stèles et des autels ainsi que de grandes places (groupe A), un groupe triadique et une acropole « funéraire » (Groupe C). Le groupe B, limité à la partie sud-est du site, correspond davantage à une zone résidentielle, certainement destinée à l'élite, qui se compose de plusieurs patios. Autour du centre cérémoniel, on trouve une vaste zone résidentielle qui couvre les 150 Ha restants des collines du site et qui ne compte pas moins de 600 structures archéologiques.



Figure 1.14 – Photographie de l'acropole de Naachtun (gauche, © Begel Johann) et d'une vue du *bajo* de Naachtun prise depuis le point haut de la pyramide principale du groupe A.

Jusqu'à il y a peu, le territoire à l'extérieur du centre de *Naachtun* était considéré comme une zone rurale relativement moins peuplée. L'obtention du LiDAR a permis de déterminer que l'ensemble du territoire de la cité, en dehors des zones de *bajo*, avait une densité d'habitat assez importante (Fig 1.13). Il a également permis la mise en évidence de chaussées reliant Naachtun à d'autres sites du Classique (Canuto et al., 2018).

iii). Le royaume de la Chauve-souris

Les deux derniers programmes archéologiques ont mis en place un cadre chronologique dans la construction de la cité de *Naachtun* par la découverte de contextes archéologiques datables (céramiques, mesures radiocarbone). Une histoire politique de la cité a également pu être développée par l'interprétation de glyphes et de représentations sur stèles et autels calcaires qui permettent la datation et la description d'événements survenus dans la cité.

La fondation de *Naachtun* semble intervenir lors de la transition Préclassique-Classique autour de 150 CE, dans le même temps où de grandes cités des basses-terres centrales comme *Nakbe* ou *El Mirador* sont « abandonnées ». Il est toutefois possible que ce site ait évolué depuis une occupation éparse Préclassique (Hiquet et al., 2016).

Dès le IV^{ème} siècle CE, *Naachtun* semble être le centre politique et dynastique du royaume de la Chauve-souris contrôlant plusieurs cités du nord-Petén. Cette position est en lien avec la première phase de croissance du site où les principaux ensembles monumentaux du centre politique vont être érigés (pyramide, terrain de jeu de balle). En 378 CE, *Naachtun* participe à la prise de *Tikal* par *Teotihuacán* au côté de cette dernière (Nondédéo et al., 2016). Cette alliance va profiter à *Naachtun* qui va s'imposer, au cours du V^{ème} siècle, comme une capitale régionale, dominant même un moment *Calakmul* et étendre son architecture parallèlement à son nouveau statut politique.

La défaite de *Tikal* en 562 CE, imposée par *Calakmul*, correspond à un ralentissement de la croissance architecturale de *Naachtun*. Cette période pourrait correspondre à une nouvelle phase de l'histoire politique de *Naachtun* qui passerait alors sous domination de *Calakmul* (Patrois, 2016). Cette nouvelle domination prend fin au début du VIII^{ème} siècle CE avec les victoires de *Tikal* sur *Calakmul*. Cette période va correspondre avec une nouvelle phase de construction de monuments et de places à *Naachtun*. La dernière inscription trouvée sur le site date de 760 CE et marquerait un affaiblissement du pouvoir royal, seulement quelques années après son arrivée. Les archéologues rapportent l'arrivée d'une nouvelle élite, noble, qui va restructurer le pouvoir politique et économique de la cité, entraînant la construction d'une nouvelle phase du bâti et une expansion démographique.

L'abandon de la cité à la fin de la période Classique va s'organiser sur un siècle. A partir de 830 CE, *Naachtun* connaît une forte perte de ses habitants avec une réorganisation spatiale de la population dans le groupe B du site. L'abandon définitif du site est actuellement daté à 950-1000 CE et apparaît relativement graduel, certaines dates de l'épicentre repousseraient les dernières occupations au début du XII^{ème} siècle CE (Nondédéo et al., 2013).

III. Forêts et agricultures dans les basses-terres centrales

1. L'abandon des forêts des basses-terres centrales

i). De Cortés à Stephens et Catherwood : où sont les Mayas ?

Lors de l'expédition de 1525 vers *Las Hibueras* (actuel Honduras), Hernán Cortés – à la tête de l'armada conquistador qui arriva au Yucatán 6 ans auparavant – décide d'un parcours terrestre depuis Mexico, traversant ainsi les forêts du Campeche et du Petén (Pagden et Elliot, 1986, Sharer et Traxler, 2006). Si Cortés rapporte l'existence de la grande ville *Itza de Tayasal* (ou *Noj Petén*), correspondant à l'actuelle île de *Flores*, il ne croise majoritairement que des villages de tailles modestes dans les basses-terres centrales (Charnay, 1896). Étant vraisemblablement passé à une trentaine de kilomètres de *Tikal*, la cinquième lettre de Cortés, destinée à Charles Quint, ne fait mention d'aucun vestige maya ancien (Charnay, 1896). Les sites des basses-terres abandonnés à la forêt ne vont être « officiellement » décrits qu'à la fin du XVIème siècle en de très rares occasions : les sites de *Palenque* et de *Copán* sont rapportés par Diego Garcia de Palacio dans sa lettre au roi de 1576 (Demarest, 2004) tandis que le site d'*Uxmal* le sera en 1588 dans les écrits d'Antonio de Ciudad Real sur les expéditions yucatèques de Diego de Landa (Perry, 2001).

A la suite de l'administration du Yucatán par le royaume d'Espagne, plusieurs expéditions ont eu lieu dans le but de christianiser et/ou soumettre les populations de la région du Petén, notamment le site de *Tayasal* (Sharer et Traxler, 2006). En 1618-19, soit presque un siècle après l'accueil de Cortés à *Tayasal*, des moines franciscains y sont également reçus tandis que trois ans plus tard, une expédition militaire venue du Yucatán est défaite par le royaume Itza. A partir de 1695, des expéditions vont être lancées depuis la côte du Belize, le Yucatán et les hautes-terres du Guatemala et vont mener à la chute de *Tayasal* et du royaume Itza en 1697 (Jones, 2008). Les fonctionnaires et prêtres espagnols, s'ils sont habitués aux sites mayas anciens du nord du Yucatán, ont peu rapporté la présence de sites anciens dans les basses-terres centrales durant cette période (Demarest, 2004). Depuis Cortés et jusqu'à la toute fin du XVIIème siècle, l'image principale qui semble ressortir de ces deux siècles d'expéditions, c'est qu'en dehors de la grande cité de *Tayasal* et de quelques cités abandonnées, les basses-terres sont, et ont été, relativement peu peuplées.

Ces rares prospections espagnoles ont, toutefois, encouragé de nombreuses entreprises de recherches de ces ruines à partir du XIXème siècle. Ainsi, sur une période de 50 ans, les sites des basses-terres centrales, parmi les plus connus aujourd'hui, sont (re)décrits et surtout publiés : *Copán*, *Palenque*, *Tikal*, *Yaxha* (Demarest, 2004). Ces premiers travaux vont largement inspirer Stephens et Catherwood – explorateurs, respectivement écrivain et illustrateur – tant pour les sites étudiés que pour le matériel utilisé, dans la réalisation de leur *Incidents of Travel in Central America, Chiapas and Yucatán* paru en 1841 (Stephens et Catherwood, 1991, réédition). Cette première parution va marquer le début d'une nouvelle vague d'exploration des cités perdues de Mésoamérique et les premiers travaux archéologiques (Demarest, 2004).



Point Tardigrade : “Petén indépendant !”

En 1821, puis 1823, les provinces de la capitainerie générale du Guatemala (Chiapas, Comayagua, Guatemala, Nicaragua) déclarent respectivement leur indépendance, au royaume d’Espagne et au Mexique. Le Guatemala ne devient un pays indépendant qu’à partir de 1842.

A la fin des années 1840, le Guatemala réclame la souveraineté sur le Petén en envoyant une force militaire à Flores. Le Mexique considérant que cette région avait peu de valeur abandonna le Petén à la république du Guatemala.



Figure T3 – Carte des états-unis du Mexique et du Guatemala de 1847

Après 150 ans de recherches archéologiques en Mésoamérique, c’est près de 400 sites mayas qui ont été décrits, fouillés et/ou publiés. La page Wikipédia qui liste les sites mayas en dénombre 369, dont un peu moins de la moitié peuvent être localisés dans les basses-terres centrales. L’atlas électronique de localisation des anciens sites mayas montre les basses-terres centrales comme un important foyer d’occupation maya (Witschey et Brown, 2014). Cette richesse archéologique va de pair avec les travaux sur la démographie passée des populations mayas. Les estimations concernant la démographie des populations indiennes centraméricaines, avant l’arrivée des espagnols au début du XVIème siècle CE, varient entre 5 à 6 millions de personnes (Denevan, 1992 ; Alchon, 2003). Les travaux LiDAR menés sur les basses-terres centrales ont récemment fait une réévaluation de ce chiffre à l’échelle de la région pour le Classique terminal, sur la base des structures archéologiques, à 7-11 millions d’habitants (Canuto et al., 2018). Une telle densité de population pose la question du devenir de ces populations dans ces basses-terres centrales entre la fin du Classique et l’arrivée des colons espagnols.

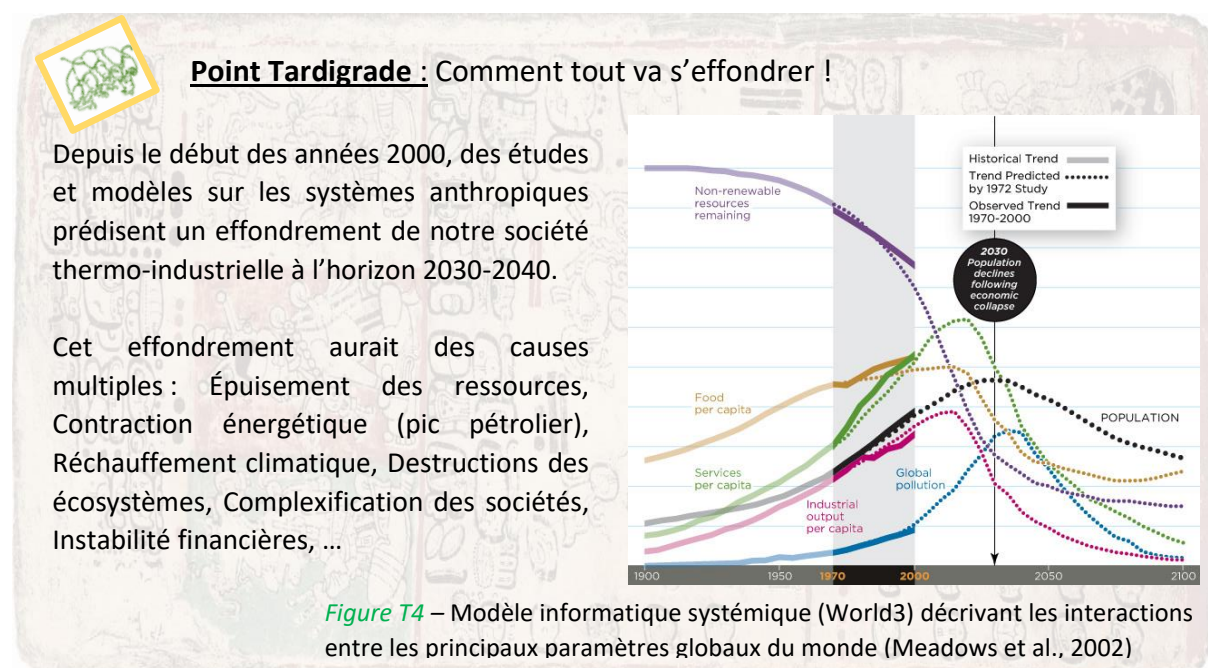
ii). Gun, Germs and Climate

Après leur origine extraterrestre ou atlante (Wauchope, 1962), l’une des questions parmi les plus populaires de notre imaginaire sur les populations mayas, qu’elles aient été mises en scène sous forme de romans, de films ou de livres de vulgarisation scientifique, concerne leur effondrement, voire disparition (Diamond, 2006 ; Tainter, 2013). Si cette notion d’effondrement n’est pas partagée par les mayanistes, il est probable que le phénomène qui y a été associé soit en partie responsable de l’absence d’habitant dans les forêts du Petén à l’arrivée des espagnols.

Un phénomène d’effondrement se définit aujourd’hui comme « *un processus à l’issue duquel les besoins de base (eau, alimentation, logement, habillement, énergie, etc.) ne sont plus*

fournis à une majorité de la population par des services encadrés par la loi » (Cochet, 2011). Cette définition sociétale et systémique, adaptée à nos crises actuelles, se décline également dans le cadre des civilisations passées comme un processus de « *drastic decrease in human population size and/or political/economic/social complexity, over a considerable area, for an extended time. The phenomenon of collapses is thus an extreme form of several milder types of decline, and it becomes arbitrary to decide how drastic the decline of a society must be before it qualifies to be labeled as a collapse* » (Diamond, 2006). Si une partie de la communauté mayaniste rechigne à parler d'effondrement pour la civilisation maya (Demarest, 2004), des événements de déclin sociétaux et de changements culturels, assimilables à des effondrements selon ces deux définitions, sont toutefois survenus à la fin de la période Classique dans les basses-terres centrales.

Les premiers indices de déstabilisation de la société maya apparaissent dans la région du *Petexbatún*, un lac au sud-ouest du Petén. A la fin du VIII^{ème} siècle CE, cette région, qui à cette époque est sous domination du centre de *Dos Pilas*, va entrer dans une phase de militarisation intense (Demarest, 2004). Elle reflète une période de conflits répétés qui vont entraîner la destruction et/ou l'abandon des principaux sites de la région au IX^{ème} siècle CE (*Dos Pilas, Tamarindito, Aguateca*, etc.) et se traduire par des déplacements de personnes vers les centres fortifiés, puis/et vers les régions limitrophes (O'Mansky et Dunning, 2004). Pour cette région, la période du Classique terminal, soit un peu plus d'un siècle, marque donc une phase de déstructuration de l'organisation politique et sociale (fin du culte au *K'uhul Ajaw*), une rupture du système économique et commercial, et une forte réduction de ses habitants. Sur la base des stades d'effondrement définis par Orlov (2013) – incluant les déclinés financier, économique, politique, social, culturel (et depuis peu écologique) – il est possible de parler d'un réel effondrement pour la région du *Petexbatún*.



Les mêmes phénomènes de rivalité, conflit, prise de pouvoir, accompagnés de déplacements

de populations et de réductions des habitants vont s'observer avec un léger décalage dans les autres régions des basses-terres centrales ainsi que dans les basses-terres méridionales. Dans la région de l'*Usumacinta* (qui forme une partie de la frontière entre le Petén et le Chiapas), on note la fin des grands travaux et un dépeuplement des sites de *Palenque*, *Piedras Negras*, ou encore *Yaxhilán* au cours du IX^{ème} siècle CE (Demarest, 2004). Dans les basses-terres méridionales honduriennes, pour les grands centres politiques comme *Copán* ou *Quirigua*, la fin des constructions monumentales civiles est datée du début du IX^{ème} siècle CE mais la diminution de population est plus lente que dans les autres régions des basses-terres (Fash et al., 2004). Une autre zone de déclin se trouve dans les basses-terres centrales où les principaux centres politiques de la période classique, comme *Tikal* et *Calakmul*, vont peu à peu perdre de l'influence sur les centres secondaires. Demarest (2004) rapporte que le dernier monument érigé à *Tikal* est daté de 869, quand la population de *Calakmul* et de *Rio Bec* au nord ne représente qu'un dixième de leur apogée au début du X^{ème} siècle.

Si ces phénomènes de dépeuplement et d'abandon prennent une ampleur considérable à la fin du Classique, au point d'être considérés par endroit comme de réels effondrements, d'autres régions des basses-terres vont être relativement moins touchées par ce processus. C'est notamment le cas de cités du Belize où la population va rester stable, voire augmenter, en lien avec la poursuite d'une architecture civile et monumentale (Chase et Chase, 2004). Toutefois, ces cités vont également être abandonnées au tout début du Postclassique, comme cela a été le cas avec *Caracol*, capitale régionale, qui va être délaissée au cours du XI^{ème} siècle (Demarest, 2004). On considère aujourd'hui qu'à la transition X-XI^{ème} siècle CE, les basses-terres méridionales et les basses-terres centrales sont dépeuplées, voire abandonnées et seules quelques zones, comme Petén-Itza, vont fonder un nouvel ordre politique. Si les basses-terres méridionales et les basses-terres centrales montrent un déclin marqué à la fin du Classique, les basses-terres septentrionales connaissent, quant à elles, une période d'épanouissement politique et culturel. Il est fort probable que cette période d'expansion des basses-terres septentrionales soit en lien avec une importante migration de populations venues des basses-terres centrales.

Comme déjà mentionné précédemment, les hypothèses concernant les causes de cet effondrement régional sont nombreuses, près d'une centaine (Webster, 2002). Ces théories résultent de la diversité des processus ayant eu lieu régionalement, de leur diachronie, et donc de l'impossibilité d'appliquer une généralisation d'un site à l'autre. En effet, s'il semble que l'état de guerre ait été commun aux basses-terres méridionales et basses-terres centrales au Classique terminal, cela ne reflète qu'une des conséquences de l'effondrement politique, mais n'en révèle pas les causes. La rareté des contextes archéologiques de cette période n'aide pas à la construction d'une théorie générale (Demarest, 2004). Ainsi parmi celles retenues, se retrouvent des causes internes aux Mayas comme les révoltes sociales (Thompson, 1980), les invasions étrangères (Demarest, 2004) et les ruptures de réseaux commerciaux (Webster, 2002). Ces causes sont, généralement, opposées aux processus externes comme des catastrophes naturelles (Brocard et al., 2016) ou le changement climatique (Hodell et al., 1995 ; Haug et al., 2003 ; Medina-Elizalde et Rohling, 2012). On notera toutefois que le

traitement de la plupart de ces causes uniques, a la fâcheuse tendance à entraîner des évaluations sur la base d'enjeux et/ou intérêts contemporains (Diamond, 2006 ; McAnany et Yoffee, 2010 ; Tainter, 2013). La multicausalité apportée par les méthodologies de recherches socio-environnementales pallie en partie ce biais et conduit à la construction de théories, testables par des modèles d'interactions systémiques (Roman et al., 2018), telles celle mettant en lien une surexploitation des environnements, une surpopulation, une dégradation écologique et les problèmes politiques (Demarest, 2004).

Dans tous les cas, les causes de l'effondrement Classique des basses-terres méridionales et des basses-terres centrales sont plutôt associées à des déplacements de populations qu'à une augmentation soudaine de la mortalité dans ces régions. Jusqu'à aujourd'hui, aucun charnier ou fosse commune n'a été mis à jour par les archéologues (Folan et al., 2000). Sur cette base, les théories de réduction des populations mayas des basses-terres à la période Classique par épidémie ou maladie nutritionnelle (Wilkinson, 1994 ; Acuna-Soto et al., 2005) sont aujourd'hui peu considérées. Toutefois, l'arrivée massive des espagnols et de leur pathogènes au XVIème siècle CE n'a pas été anodine pour les populations centraméricaines (Crosby, 1976). Lors de cet événement que l'on nomme « échange colombien », des études estiment une réduction de plus des trois-quarts de la population amérindienne sur une période de deux siècles, essentiellement due à l'apparition de maladies du vieux-continent, comme la variole, la rougeole, le typhus, auxquelles les populations n'étaient pas résistantes (Crosby, 1976 ; Diamond, 2000 ; Nunn et Qian, 2010). Si ces épidémies n'ont pas épargné le Yucatán, le dépeuplement des basses-terres centrales avait déjà été bien amorcé au cours de l'effondrement de la fin de la période Classique et il est fort probable que les populations mayas résiduelles des basses-terres centrales aient été moins touchées que leurs homologues des basses-terres septentrionales.

iii). Les Mayas n'ont plus disparu !

De ces deux derniers points, on peut conclure que la fin de la période Classique correspond à la fin de la tradition maya dans les basses-terres mayas et que l'arrivée des espagnols au XVIème siècle CE, puis des guerres coloniales menées au cours du XVIème et XVIIème siècle CE, marquent la fin de la tradition maya en Amérique centrale, notamment avec la chute de *Tayasal* en 1697. Et pourtant, si la civilisation maya antique a disparu, les ouvrages de sciences humaines, portant sur l'époque contemporaine et titrant le mot « maya » ou en faisant le sujet principal, ne sont pas rares (ici seulement en français, Breton et al., 1991 ; Le Bot, 1992 ; Lobato, 1997 ; Ragot et al., 2002 ; Magni , 2017 ; Jouault, 2018).

Lorsque l'on parle des Mayas pour notre époque, on considère qu'il s'agit de populations amérindiennes indigènes de la Mésoamérique, ou grossièrement de l'Amérique centrale, c'est-à-dire dont les ancêtres généalogiques peuplaient les régions avant l'échange colombien. Cette définition peut également être recoupée avec une définition linguistique qui considère les Mayas comme les locuteurs d'une langue appartenant à la famille des langues

mayas (ex : Itza', Mopan, Tzotzil, Ixil, K'iche'). Aujourd'hui, les Mayas représenteraient une population de 5 à 10 millions de personnes réparties sur une aire correspondante à l'ancienne Mésoamérique (Pérez-Castro, 2002). Au Guatemala, les populations indiennes constitueraient la moitié de la population (Le Bot, 1992) et représenteraient la plus grosse communauté indienne et maya d'Amérique centrale.



Point Tardigrade : Culture maya au Guatemala

L'usage des langues mésoaméricaines, s'il tend à se raréfier, ressort dans les cultures nationales. Ainsi la "République du Guatemala" serait héritée du nahuatl *Cuauhtēmallān*, dérivé de la langue maya K'iche', signifiant "Lieu rempli d'arbres", quand le mot *maya* représenterait à la fois le "maïs" et les populations éponymes. Aussi le mot *Petén* proviendrait du maya yucatèque signifiant "île" et faisant référence à Tayasal, l'ancienne cité située sur une île du lac, aujourd'hui nommé *Petén Itza*, et aussi appelé *Noh Petén* "l'île du sud" ou *Zac Petén* "l'île blanche".

Les Mayas antiques sont reconnus pour le développement d'un savoir architectural, astronomique, mathématique, naturaliste, technique ainsi que le développement indépendant d'une écriture glyphique, d'un style artistique et d'une spiritualité (Demarest, 2004). Aujourd'hui, seules les pratiques culturelles et agricoles, résiduelles par rapport à la période maya ancienne, sont encore représentées dans les populations amérindiennes d'Amérique centrale. Pour illustrer ce propos, nous nous intéresserons ci-dessous à l'agriculture maya dans ses composantes archéologique, géographique, culturelle et environnementale.

2. La Mésoamérique vue par l'agriculture

i). Mayas et terres : l'agriculture comme identité ?

« Une terrible douche froide est tombée sur tous les admirateurs du Guatemala. Dans la nuit du dimanche 28 juin, le président Árbenz a fait une déclaration de démission insolite. Il a dénoncé publiquement la Compagnie fruitière et les États-Unis comme responsables directs de tous les bombardements et mitraillages sur la population civile ». Ce texte de Juillet 1954 est tiré du journal de voyage d'Ernesto Guevara lors de son séjour à Ciudad de Guatemala. Il fait référence à un des événements politiques du XX^{ème} siècle, les plus marquants du Guatemala, qui mettra fin au « Printemps Guatémaltèque » (1944-1954) (Bergeret, 2012).

L'année 1944 correspond aux premières élections présidentielles libres du Guatemala après le reversement des dictatures. L'élection de Juan J. Arévalo, comme premier président démocratiquement élu du Guatemala, va entraîner l'écriture d'une nouvelle constitution, plus favorable aux classes populaires, notamment indiennes, en établissant une souveraineté économique, une politique libérale incitant à l'investissement privé, un nouveau code du travail et des directives réduisant la ségrégation amérindienne. Toutefois, les premières politiques agraires proposées par Arévalo sont assez modérées et la répartition des terres

reste majoritairement inégale, favorisant les grands propriétaires terriens au détriment des populations indiennes (Le Bot, 1992).

L'organisation agricole guatémaltèque va évoluer à partir de l'élection de Jacobo Árbenz Guzmán à la présidence en 1951, qui va poursuivre les réformes d'Arévalo. A son arrivée, les trois quarts des populations agricoles ne possédaient qu'un dixième des terres, au contraire de quelques firmes (comme la United Fruit Company) et de gros propriétaires, comptant pour moins de 5%, qui en détenaient presque les trois quarts (Gleijeses, 1992 ; Le Bot, 1992). Árbenz lance en 1952 un programme de réforme agraire, dont le décret 900 vise à attribuer des terres non-cultivées ou non-utilisées, expropriées et payées à de grandes exploitations, sous forme de fermage à de petits et moyens entrepreneurs agricoles (Bergeret, 2012). Cette réforme a permis la distribution de près de 400 000 Ha à 85 000 familles sur une durée de deux années (Handy, 1994) dont une partie conséquente provient des terres de la United Fruit Company, principale firme états-unienne d'exportation de bananes. En portant atteinte aux intérêts de cette société, Jacobo Árbenz se voit soupçonner de potentielles accointances communistes par la CIA qui lance l'organisation PBSuccess en 1954 (Doyle et Kornbluh, 1997 ; Chomsky, 2004) et qui mènera à sa démission le 27 juin de la même année. Ce coup d'état va placer à la tête du pays, à partir d'octobre 1954, Carlos Castillo Armas, colonel guatémaltèque exilé au Honduras. Au cours de sa présidence autoritaire, Armas va revenir sur la constitution de 1945, sur les droits des indigènes et sur la réforme agraire, restituant, avec bénéfice, les terres à la United Fruit Company, marquant ainsi la fin du « printemps guatémaltèque » et construisant les fondations d'un conflit armé qui débutera en 1960 et s'étendra jusqu'aux accords de paix de 1996 (100 000 à 200 000 morts, 1 000 000 de déplacés, majoritairement indiens).



Point Tardigrade : "Terre indignée"

En mai 2013, pour la première fois dans l'histoire du Guatemala, un exterminateur d'Indiens a été condamné pour génocide raciste. Un tribunal de droit commun l'a condamné à quatre-vingts ans de prison.

Le général Rios Montt avait été l'avant dernier d'une série de dictateurs militaires spécialisés dans le massacre d'indigènes mayas.

Peu après la sentence, un tremblement de terre a frappé la région : la terre, mère de tous les assassinés, a tremblé et a continué de trembler.

Elle tremblait de colère. Elle savait qu'allait arriver ce qui est arrivé : la condamnation du bourreau a été reportée par les plus hautes autorités judiciaires du pays. La terre s'est soulevée, furieuse, contre l'immunité habituelle.

*Histoire contée par **Eduardo Galeano** en 2016 dans son ouvrage "El Cazador de historias".*

Cet évènement politique est certainement le plus connu parmi ceux liés aux problématiques de l'accès à la terre par les paysans guatémaltèques et plus particulièrement les indiens. Bergeret (2012) rapporte que les années 60-70 correspondent à une période difficile pour la

petite paysannerie, les législations chaotiques des différents gouvernements sur les régimes agraires n'arrivent pas à jouer leur rôle de redistribution, amenant des tensions dans le monde agricole. Le témoignage de Rigoberta Menchú (Burgos Debray, 1983) conclut dans le même sens à la difficulté des paysans indiens d'avoir accès à la terre en raison du système de financement des terres mis en place dans les années 60. Hickey (2013) rapporte dans des documents de l'armée guatémaltèque, que la question du manque de terre était une revendication centrale pour les paysans révolutionnaires des années 80. Enfin, même les accords de paix sont considérés par certains guatémaltèques depuis lors comme trahis par certains guatémaltèques au regard des décisions économiques liées à l'agriculture (Bergeret, 2012). Il semble, alors, que la question de l'agriculture soit centrale dans l'organisation sociale au Guatemala et notamment, chez les populations mayas. Ces anecdotes historiques, si elles ont peu à voir avec le sujet traité par le manuscrit, nous permettent d'amener la question des particularités de l'agriculture maya au Guatemala pendant l'époque moderne.

ii). Pratiques populaires agricoles modernes dans les basses-terres

Pendant sa traversée du Petén dans les années 30, Lundell va écrire un article détaillant les pratiques d'un village au sud du Campeche, dans ce que nous nommons les BTC (Lundell, 1933b). L'apport principal de ce texte est de faire référence à un village maya encore isolé par rapport aux villes et villages mexicains qui commencent à être imprégnés du « mode de vie » occidental.

Il y décrit un village d'une dizaine de familles, localisé à proximité d'une lagune où les maisons familiales sont entourées par de grandes parcelles horticoles, c'est-à-dire de jardins et d'arbres fruitiers, tout comme la place du village où se trouvent d'autres arbres fruitiers. Parmi les espèces citées, on retrouve la papaye (*Caricapapaya*), le cacao (*Theobroma cacao*), le coton (*Gossypiumsp.*), l'avocat (*Persea americana*), le sapote (*Manilkarazapota*), la chayote (*Sechiumedule*), la tomate (*Lycopersicum esculentum*), le poivre (*Capsicum annum*), le tabac (*Nicotiana tabacum*), l'anone (*Annonasp.*), le limettier et l'oranger (*Citrus sp.*), le siricote (*Cardia dodecandra*), le ramon (*Brosimumalicastrum*) ou encore une plante importée par les espagnols, la banane (*Musa sp.*). Cette agriculture de proximité, permettant un traitement intensif, est complétée par une agriculture plus distante, voire régionale.

Lundell décrit aussi un système agraire éloigné du village qui s'inscrit dans l'aire de la forêt tropicale, en général, à plusieurs kilomètres du village et avec une certaine mobilité spatiale et temporelle. Il s'agit de sélectionner une zone de forêt, de la défricher sous forme d'une parcelle au cours des mois secs et d'y mettre feu avant le début de la saison des pluies. Dans un court laps de temps et toujours au début des premières pluies, les graines de cultigènes, principalement du maïs, sont plantées. Les récoltes se font, en général, 6 mois plus tard, c'est-à-dire vers la fin de la saison des pluies. Ce système nommé *milpa* correspond à l'agriculture du maïs (*Zea mays*), souvent associée à la courge (*Cucurbita sp.*) et/ou au haricot (*Phaseolus vulgaris*) et plus rarement à la tomate (*Solanum lycopersicum*) ou au piment (*Capsicum sp.*).

Ce type d'association végétale est connu en agro-écologie sous le nom de système des « trois sœurs » et est souvent expliqué comme une association mutualiste où la courge conserve l'humidité des sols par ses feuilles, le maïs sert de tuteur aux haricots qui enrichissent le sol en azote (Landon, 2008). A la saison sèche suivante, la parcelle sera de nouveau défrichée des plantes annuelles et brûlée pour une nouvelle récolte.



Figure 1.15 – Photographie d'une parcelle après un brulis récent et d'un jardin de Bananiers et d'Ananas à proximité du village de Uaxactun (© Projet PAYAMA)

Toutefois, après une seconde année de récolte, les rendements s'écroulent et la parcelle de *milpa* est abandonnée et laissée en jachère, pour une autre parcelle (ou zone) à proximité. Elle sera certainement recultivée quelques années après. Lorsqu'une zone de parcelles a été utilisée sur un long laps de temps, elle est abandonnée à cause de la baisse des capacités de rendement. Pour Lundell, cette pratique entraîne un éloignement des parcelles et explique pourquoi les parcelles actuelles se situent à plusieurs kilomètres de certains villages. Enfin, les grandes parcelles de *milpa* sont souvent attenantes à de plus petites parcelles horticoles permanentes où Lundell note la présence de camote (*Ipomoea sp.*), de macal (*Dioscoreaalata*), de yucca (*Yucca elephantipes*) et d'arbres fruitiers comme le cacao, la papaye, ou le bananier.

Ce modèle, décrit au Petén par Lundell (1933b), a longtemps été considéré comme le seul productif à l'échelle des basses-terres tropicales forestières de l'Amérique et c'est par ailleurs, ce même modèle que décrit Meggers (1954) pour l'Amérique du Sud. Ce modèle productif, mais insuffisant pour de fortes populations comme les anciens Mayas, n'est pourtant qu'une des nombreuses pratiques agricoles post-coloniales qui subsistent et ne donne qu'un exemple minimal des pratiques agricoles mises à jour par les travaux ethnographiques et archéo-environnementaux.

3. Adaptation des sociétés mayas à la forêt tropicale des basses-terres

i). De la difficulté à produire dans les basses-terres mayas

Lorsque l'on regarde un talus, un décrochement, une coupe, dans la région située entre Naachtun et Uaxactún, et en dehors des zones de *bajo*, ce qui nous surprend, c'est la faible épaisseur des sols avant la roche-mère calcaire, ne dépassant que rarement 50cm d'épaisseur.

Comme déjà dit, ces sols de type Rendosol se retrouvent majoritairement sur les escarpements et les collines karstiques ainsi que sur les pentes (Beach et al., 2008). Ces sols tropicaux, à forte composante argileuse, évoluent rapidement, sont facilement érodés, et présentent des teneurs peu élevées en matière organique (Beach, 1998). En effet, la majorité de la biomasse se situe au niveau de la canopée (Puig, 2001). Ainsi, dans cette zone tropicale, un défrichement prolongé des milieux risque d'amener à un épuisement des sols voire à sa latérisation (Demarest, 2004).

Les cours d'eau et les étendues d'eau sont assez rares sur le territoire du Petén. Malgré l'abondance des eaux de pluies, le terrain karstique entraîne la plupart des eaux dans les nappes en profondeur. Ainsi, l'accès à l'eau est assuré uniquement par quelques dépressions palustres pérennes, en contrebas de ces escarpements, que forment les lagunes et les *Sival* (zones d'eau des *bajo*). Les sols des *bajo* correspondent davantage à des accumulations de particules alluviales et colluviales provenant des escarpements, qui constituent des Vertisols, sous forme de couches d'argiles assez épaisses et très pauvres en matière organique (Beach, 1998). En effet, tout comme les sols de collines, l'humus est rapidement minéralisé.

Dans un tel contexte, il a longtemps été difficile de concevoir la croissance d'une grande civilisation agricole dans les basses-terres centrales. Betty Meggers (1954) considère que les forêts tropicales centraméricaines ne peuvent pas soutenir une agriculture intensive et rentable en continu. Ainsi, dans son tableau des types d'environnement, elle considère que ces écosystèmes ne permettent pas le développement de grandes populations complexes. Dans son analyse de cas des anciens Mayas, elle soutient donc l'hypothèse d'une culture diffusée vers les basses-terres mayas dans un environnement inadapté, expliquant ainsi leur déclin quelques centaines d'années plus tard. Cette théorie a été réutilisée par la suite à plusieurs reprises, mettant en doute la capacité des Mayas à utiliser une agriculture raisonnée et expliquant ainsi l'effondrement de la période Classique (Dumond, 1961 ; Turner, 1974).

Cette théorie déterministe a, depuis, été remise en cause au regard des découvertes sur le développement de l'agriculture mésoaméricaine mais également par les récents travaux sur les densités de population du Petén (Canuto et al., 2018). Les traces de sociétés agricoles dans les basses-terres centrales sont présentes dès le Préclassique et la soutenabilité d'une telle population reposait, en grande partie, sur la diversité des modes de productions alimentaires (Demarest, 2004). L'arrivée des espagnols et leur politique coloniale a contraint une transformation en profondeur des sociétés agricoles mésoaméricaines à partir du XVIème siècle et la plupart des traditions agricoles passées sont, aujourd'hui, certainement perdues (Demarest, 2004). La reconstruction de ces pratiques passe donc, aujourd'hui, par les travaux ethnobotaniques sur les communautés indiennes modernes et par l'étude des indices archéologiques d'agriculture ancienne. Nous proposons ci-dessous une rétrospective des indices concernant les pratiques agricoles en Mésoamérique et plus particulièrement dans les basses-terres mayas.

ii). Des traces précoces d'agriculture en Mésoamérique

La colonisation du continent Américain survient à la fin de la période pléistocène par le pont continental du détroit de Béring. Ces premières populations sont considérées comme nomades et associées à des cultures de type chasseurs-cueilleurs. Les plus anciennes traces mises à jour de ces populations en Mésoamérique sont datées entre 14 000 et 8000 BCE (Darras, 2000 ; Gonzalez et al., 2015).

Les fouilles organisées dans les contextes archéologiques du Bassin de Mexico sur des niveaux anté-Préclassiques (archaïque, formative, céramique, etc.) ont commencé à livrer des restes de végétaux domestiqués dès les années 60. MacNeish (1958) rapporte la présence de restes carpologiques de courges et Calebasses (*Cucurbitapepo*, *Lagenariasiceraria*), de haricots (*Phaseolus vulgaris*) dans des dépôts de grottes mexicaines, allant de 7000 à 3000 BCE. Sur d'autres grottes centre-mexicaines, ces mêmes cultures, piments (*Capsicum sp.*) en plus, semblent déjà entretenues sur des niveaux à 5000 ans BCE (MacNeish et al., 1970). A ces mêmes niveaux, des traces d'agaves (*Agave sp.*) ont été rapportées (Callen, 1965). Du maïs (*Zea mays*) a également été mis à jour sur des niveaux relativement plus récents, autour de 2500 ans BCE. Depuis, ces dates ont été revues et ont été réévaluées autour de 3000 ans BCE (Smith, 1997b). Ces nouvelles datations ont, en revanche, confirmé, par des études directes sur les épis, l'ancienneté du maïs avec des dates comprises entre 3500 et 2000 BCE (Fritz, 1994 ; Smith, 1997b ; Piperno et Flannery, 2001). L'étude de grains d'amidon dans cette région a permis d'attester la présence de piments cultivés autour de 4000 BCE (Perry et al., 2007). Quant aux zones où les populations semblent un peu plus sédentaires, dans ce bassin de Mexico, certaines plantes semblent déjà entretenues et/ou sélectionnées entre 6000 et 4000 ans BCE, telles que l'amarante (*Amaranthus sp.*), la courge (*Cucurbita sp.*), la tomatille (*Physalis sp.*) ou encore le maïs (*Zea mays*) (Niederberger Betton, 1987).

Un peu plus à l'Ouest, les travaux menés dans la région centrale, forestière et humide du Rio Balsas ont également permis l'identification d'amidon et de phytolithes de maïs et de courge (*Cucurbita argyrosperma*) vers 6500 ans BCE ainsi que potentiellement des premières populations de haricots cultivés (Piperno et al., 2009 ; Ranere et al., 2009). Des travaux sur l'horloge moléculaire des variétés du Genre *Zea sp.*, incluant les maïs et les téosintes, confirment une apparition des lignées domestiques de maïs autour de 7000 ans BCE (Matsuoka et al., 2002).

Dans la vallée d'Oaxaca, près du golfe du Mexique, des graines de courges ont également été identifiées dans des niveaux de grottes datés à environ 8000 ans BCE (Flannery, 1987). Lors des travaux de révisions, ces niveaux ont été confirmés à 8000 ans BCE (Smith, 1997a). Dans cette même région du golfe du Mexique, sur la côte du Tabasco, des pollens de maïs et de manioc (*Manihot sp.*) ont été identifiés sur des niveaux respectivement datés à 5100 ans BCE et 4600 ans BCE (Pope, 2001). Dans la plaine du Veracruz, des pollens de maïs sont également identifiés sur des niveaux datés à 5000 ans BCE (Sluyter et Dominguez, 2006).

iii). Néolithisation en Mésoamérique

À la vue des données obtenues depuis 50 ans, l'histoire mésoaméricaine de l'agriculture semble commencer il y a 9000 ans dans les forêts tropicales semi-humides de la région centrale du *rio Balsas*. La présence endémique à cette région, d'espèces ancestrales et sauvages associées aux cultigènes, la téosinte pour le maïs par exemple, renforce cette hypothèse d'une évolution sympatrique (Sanjur et al., 2002 ; Zizumbo-Villareal et al., 2009 ; Hufford et al., 2012). Zizumbo-Villarreal et Colunga-García Marín (2010) rapportent que les populations de chasseurs-cueilleurs utilisaient déjà le feu, pour la chasse ou la création d'espaces, ce qui aurait favorisé la colonisation des plantes pyrophiles comme le maïs, le haricot, la courge, le piment ou encore des arbres à fruits comme *Spondias purpurea*. Cette première phase de domestication a, certainement, pour origine des groupes non-sédentaires situés entre les systèmes de lacs de la région de Mexico et de la côte pacifique (Ranere et al., 2009). Cela aurait permis une diffusion des cultigènes via des corridors naturels, les rivières notamment, lors d'excursion vers ces autres écosystèmes (Lavallée, 2005 ; Zizumbo-Villarreal et Colunga-García Marín, 2010).

Si ce processus de domestication est très marqué chez les végétaux, il est relativement plus rare chez les animaux. Le chien est élevé, notamment, comme nourriture au cours de ces périodes anté-Préclassiques mais il accompagnait déjà l'homme à sa traversée du détroit de Béring (Wayne et al., 2006). La plupart des mammifères et animaux de grandes tailles ayant disparu à la fin du Pléistocène, le seul animal domestiqué au cours de cette période est le dindon (*Melleagris gallopavo*) aux alentours de 5000 BCE (Diamond, 2000 ; Lavallée, 2005). Cela implique que la traction animale adaptée aux travaux agricoles n'a pas pu se développer dans les basses-terres mayas avant l'arrivée des espagnols. Il est à noter tout de suite, et pour éviter d'autres comparaisons avec nos sociétés, que les mayas n'ont pas utilisé d'outils en acier.

Entre 5000 et 3500 BCE, de plus en plus d'indices sont trouvés pour attester de cette diffusion à travers les systèmes fluviaux dans le centre du Mexique mais également vers le golfe du Mexique et plus hypothétiquement vers la côte des Caraïbes (Pohl et al., 1996). Sur cette même période, la région du *rio Balsas* présente des indices botaniques d'intensification des cultures (Piperno, 2006) et de la domestication des cultigènes (Piperno et Flannery, 2001), tout comme des indices archéologiques (lithiques, outils en bois, fours) témoignent de la complexité croissante des sociétés (Flannery, 1987). C'est à la fin de cette période que l'on voit également apparaître de nouveaux cultigènes tels que le piment, l'amarante ou encore les physalis. Cette horticulture pourrait indiquer la présence de parcelles cultivées à côté d'habitats semi-sédentaires, tout comme la présence de meules, de fours et de céramiques pour la cuisson (Zizumbo-Villarreal et Colunga-García Marín, 2010).



Point Tardigrade : Agriculture biologique

L'agriculture n'est pas une particularité associée à l'humain. Les exemples en sciences naturelles sont nombreux ou une espèce favorise ou assure la croissance ou la survie d'une espèce autres.

Ainsi on peut nommer les traces fossiles de culture microbienne *Agrichnia*, des "poissons" qui cultivent des algues, mais surtout Les fourmis coupe-feuille, *Acromyrmex* sp. ou *Atta* sp. [qui forment de longues processions dans la forêt du Petén], qui nourrissent de feuilles des champignons qui croissent et dont elles s'occupent pour obtenir antibiotiques et nourriture.



Figure T5 – Fourmis du genre *Acromyrmex* sp., dites coupe-feuille, typique des zones tropicales centre et sud-américaines (Grandeur nature, France 2).

Malgré cette complexité croissante, les traces d'habitats sédentaires liées à ce type d'agriculture ne semblent se développer qu'à partir de 2500-2000 ans BCE au Mexique central (MacNeish et al., 1970), dans le bassin de Mexico (Niederberger Betton, 1987) puis sur la côte du golfe du Mexique (Coe et al., 1967). Dans le même temps, une tradition céramique va se mettre en place en lien avec le transport, la récolte et la consommation d'un maïs qui va prendre sa forme domestique actuelle (Jaenicke-Després et al., 2003).

Le processus de Néolithisation qu'a connu la Mésoamérique en fait l'un des foyers mondiaux du développement de l'agriculture (Diamond, 2000). On y retrouve les principales phases connues dans les autres foyers à savoir : une domestication d'espèces vivantes, la sédentarisation des populations, l'apparition de paysages anthropiques, la complexification des sociétés humaines et le développement de complexes urbains et ce, dans une chronologie bien propre à la Mésoamérique (Lavallée, 2005 ; Sharer et Traxler, 2006 ; Estrada-Belli, 2011). L'agriculture mésoaméricaine, caractérisée par la culture principale du maïs, accompagnée de cultigènes périphériques et tout aussi communs (courge, haricot, tomate, piment, ...), va suivre les populations dans leur migration vers les basses-terres tropicales mayas à la fin de la période archaïque (Pohl et al., 1996 ; Wahl et al., 2006).

iv). Archéologie et diversité des pratiques d'agriculture

Lemonnier (2006) rapporte que les années 70 ont marqué un tournant dans l'archéologie maya. En effet, l'intégration de données paléoécologiques et géographiques, à l'histoire des sites, a conduit à la découverte d'une forte anthropisation dans des milieux pourtant diversifiés (escarpement, pente, *bajo*, etc.) et à une variété de pratiques agricoles. Ces travaux ont permis de mettre à mal la théorie d'une « *milpa* » hégémonique dans les basses-terres. Ils

ont conduit à une vague de recherches, archéologique et ethnobotanique, sur la complexité agricole de ces milieux tropicaux. Certaines pratiques sont présentées au sein de cette sous-partie.

Au Chiapas (Mexique), chez les populations Lacandons, les ethnologues ont identifié une culture sur *milpa* qui a peu évolué avec l'arrivée des espagnols, en partie, parce qu'ils vivent dans des petits villages au sein de la forêt. Celle-ci est moins destructive pour les sols (Diemont et al., 2006) et plus productive (Nations et Nigh, 1980 ; Cook, 2016). Si les Lacandons utilisent également un système d'abattis-brûlis, les observations menées ont montré que les grands arbres des parcelles, souvent producteurs d'une ressource, étaient systématiquement conservés et que, jusqu'à 50 espèces productrices étaient entretenues et dispersées sur une même parcelle au cours des périodes de *milpa* et de jachères (Cook, 2016). Une telle pratique favorise la production annuelle d'aliments, limite les pertes lors de la présence de pathogènes et assure la présence de gibiers (Nations et Nigh, 1980). Il a également été montré que certains Lacandons sélectionnent et plantent préférentiellement des espèces d'arbres qui jouent un rôle dans la régénérescence des sols, montrant ainsi leur compréhension des processus naturels (Diemont et al., 2006). Ce type de culture, en plus d'être avantageux et productif, s'insère plus facilement dans une société dépourvue d'outils en acier ou motorisée comme les anciens Mayas (Demarest, 2004).

Les Lacandons pratiquent également une horticulture intensive à proximité des maisons, cette production leur permettant de compléter les aliments disponibles sur l'année (Cook, 2016). Lundell (1933) avait également observé cette pratique en traversant le Petén. Cette observation d'un jardinage intensif est également soulignée chez les indiens du Petén par des travaux ethnologiques allant jusqu'à une cinquantaine d'espèces différentes (Márquez et Schwartz, 2008). Cette pratique d'une horticulture se ressent également dans les forêts des sites archéologiques où la concentration d'arbres producteurs, comme le Ramon (*Brosimum malicastrum*) est importante et peu expliquée par les conditions édaphiques (Lundell, 1937 ; Ross, 2011). Cette intuition phytosociologique s'est vue confirmée par les travaux archéo-environnementaux sur les différents sites archéologiques attestant aujourd'hui de cette même pratique de sélections et de gestions des arbres d'intérêts (Hutson et al., 2007 ; Ford, 2008 ; McNeil, 2012 ; Thompson et al., 2015).

Les Mayas ont également pu profiter des environnements palustres des *bajo* pour leur culture. Les quelques travaux archéologiques ont montré que, malgré une période d'inondation, une partie des *bajo* restaient secs et permettaient de développer une agriculture saisonnière, au moins sur les marges (Dunning et al., 1998 ; Kunen et al., 2000 ; Beach et al., 2009). Ces observations sont notamment vérifiées pour les basses-terres centrales où la densité de population a poussé les populations à pratiquer la culture sur brûlis dans les *bajo* (Demarest, 2004). Récemment, les investigations LiDAR sur la partie Nord du Petén ont permis de montrer l'existence de structures associées à de l'agriculture au sein des zones humides (Canuto et al., 2018).

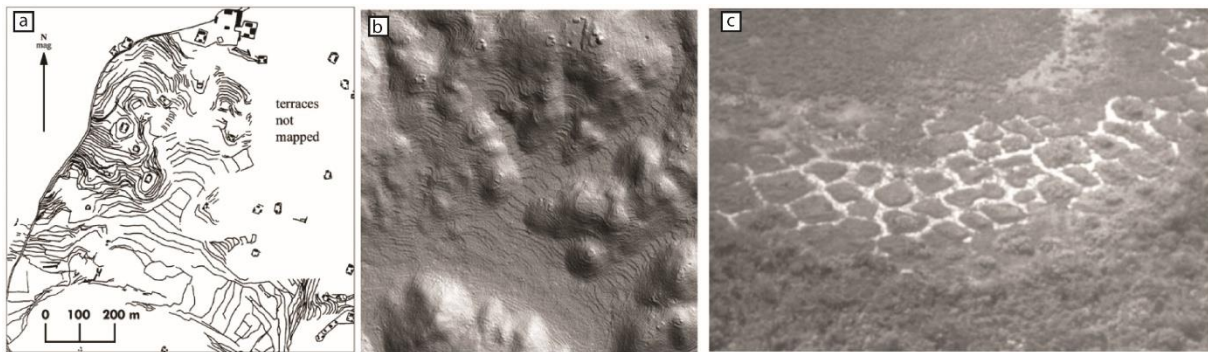


Figure 1.16 – Illustration d’aménagements mayas du paysage pour des besoins agricoles. a, b = Illustration en représentation manuel et modélisation de terrain des terrasses agricoles du site de Caracol (d’après Chase et al., 2011), c = Vue aérienne d’un système de champs surélevés à travers des canaux à Pulltrouser swamp (d’après Turner et Harrison, 1983).

Pour compléter ces pratiques développées en lien avec leurs milieux naturels, les Mayas ont également travaillé à modifier le paysage pour adapter leurs environnements et la production vivrière. L’une de ces adaptations paysagères les plus connues sont les terrasses agricoles, avec pour célèbre exemple, les terrasses de *Caracol* (Healy et al., 1983 ; Chase et al., 2011). Le terme de « terrasse » regroupe un ensemble de pratiques précolombiennes qui consistent à former un maintien de sol des collines sous la forme de crêtes de pierres, permettant ainsi de limiter leur érosion et d’y conserver l’humidité. On retrouve ces formes de terrassement, dans les fonds de vallées et sur les versants de dépressions, dans plusieurs sites des basses-terres centrales (Demarest, 2004). Ces modifications des paysages touchent également les zones de *bajo* comme l’illustrent les champs surélevés comparables au modèle des zones de *chinampas* du Mexique. Il s’agit de creuser des canaux pour drainer l’eau tout en créant des buttes et des îlots de terre. Par ce système, les terrains ne sont pas noyés et la boue organique sert d’engrais (Demarest, 2004). Toutefois, les travaux menés sur ces structures dans les basses-terres centrales laisseraient plutôt penser à des ajustements de la hauteur d’eau (Beach et al., 2009).

De ce rapide exposé, il ressort que l’agriculture maya telle qu’elle est conçue aujourd’hui, est un système agroforestier complexe qui s’illustre sous la forme d’une mosaïque du paysage. Une diversité spatiale s’exprime, notamment, par l’enregistrement de cultures domestiques réduites mais intensives, proches des habitats, qui contrastent avec une agriculture du maïs, plus excentrée des habitats, dite extensive (Killion, 1992). Une diversité écologique s’exprime également par la variabilité des pratiques qui semblent résulter d’une adaptation aux particularités géomorphologique, écologique ou climatique des régions (Demarest, 2004 ; Lemonnier, 2006). Il est donc certain que les sociétés mayas avaient une connaissance poussée de leurs environnements, toutefois, cette exploitation intensive et continue des paysages dans les basses-terres centrales soulève toujours des questions sur le rôle de l’agriculture dans les événements d’effondrement.

- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 2 -

Les phytolithes pour l'étude des paysages néotropicaux

Les premiers phytolithes observés, par Ehrenberg, proviennent certainement de poussières cap-verdiennes filtrées par Darwin depuis les voiles du Beagle. On ne peut imaginer meilleure image pour introduire une histoire naturelle des phytolithes. Ces particules siliceuses microscopiques sont abondamment trouvées dans les sols et les sédiments. Elles sont formées par saturation de l'acide silicique dans les tissus des végétaux terrestres et participent donc à leurs fonctions biologiques mais prennent également une part importante dans le cycle continental du Silicium.

Leur formation intra ou inter-cellulaire, dans les tissus de la plupart des taxons végétaux, entraîne une hétérogénéité morphologique, qui accompagnée d'une minéralisation feraient des phytolithes des bioindicateurs idéaux de la végétation. Pourtant ces derniers sont peu mobilisés dans la littérature, au regard des autres indicateurs archéobotaniques, en raison de biais taxonomiques. En effet, un taxon produit plusieurs phytolithes qui peuvent chacun être produit à l'identique chez un autre taxon. Cette multiplicité et redondance conduit le taxonomiste à considérer qu'à de rares exceptions un phytolithe ne peut pas être indicateur d'un taxon, ni donc de son biotope. Ne pouvant être nommé sur la base d'une adéquation taxonomique, les phytolithes sont donc sanctionnés par une paranomenclature qui se base sur leur morphologie et sur l'écologie de l'ensemble des plantes qui les produisent. La démarche utilisée pour signer les environnements modernes et reconstituer les paléoécosystèmes consiste donc à étudier les assemblages des morphotypes de ces derniers.

Cette méthodologie par assemblages a été appliquée sur le continent américain. Beaucoup d'études se sont notamment intéressées aux zones de plaines herbeuses en raison des nombreux phytolithes caractérisant les types écologiques d'herbes. Des travaux ont également été conduits sur la capacité des phytolithes à indiquer des environnements passés à partir des assemblages fossiles. Depuis une dizaine d'années, les recherches phytolithiques s'intéressent à la caractérisation phytolithique des milieux forestiers tropicaux du continent en raison des contextes archéologiques riches. Pourtant, les phytolithes des basses-terres maya n'ont pas fait l'objet d'un développement analogue aux autres forêts néotropicales.

Pourtant les phytolithes semblent un bioindicateur idéal pour les questionnements environnementaux en zone maya : plus résistants que les microfossiles organiques, peu sensibles aux altérations taphonomiques, une bonne réponse écologique aux plantes monocotylédones, etc... Au vu des publications en zones forestières tropicales, étudier les environnements passés en zone maya avec les phytolithes doit donc passer par une réflexion sur les assemblages constitutifs des écosystèmes moderne afin de calibrer les interprétations sur les assemblages fossiles. Enfin, comme tout bioindicateur les signaux écologiques des phytolithes sont aisément comparables à ceux d'autres bioindicateurs, et dans notre cas : les spicules d'éponges, les diatomées et les assemblages malacologiques.

- CHAPITRE 2 -

Les phytolithes pour l'étude des paysages néotropicaux

I. Histoire naturelle des phytolithes

1. Des pierres venues des plantes

i). Identification des phytolithes et de leur origine botanique

Le terme « phytolithe » est construit à partir du grec *φυτό* (la plante) et *λίθος* (la pierre) et fait aujourd'hui référence aux biominéralisations des plantes. Les différents synonymes donnés à ces particules (*phytolitharia*, *silica bodies*, *opal phytoliths*, *silica phytoliths*, *silica cells*, *plant opal* ou encore *biogenic opal*) font tous référence à cette nature minérale, principalement siliceuse. S'il existe des biominéralisations d'oxalate de calcium chez certaines plantes (Franceschi et Nakata, 2005), elles ne sont pas étudiées dans ce mémoire.

La présence de dépôts siliceux dans les tissus végétaux est indiquée dès 1815 par Davy et al. dans son ouvrage *Elements of agricultural chemistry*. S'il indique la stabilité chimique de ces dépôts, il ne les figure pas. Leur première description en 1935, sous la forme de « petit corps de silice opaline », est l'œuvre de G.A. Struve qui étudie les particules silicifiées du *tabaschir*, substance pharmacologique extraite du bambou (Prychid et al., 2003). En 1832, C. Darwin prélève, au large du Cap-Vert, un sachet de poussières éoliennes recueillies sur une voile du *HMS Beagle* (Darwin, 1839). En 1838, ce sachet ainsi que quatre autres, prélevés au large des côtes africaines par C. Lyell et adressés à C. Darwin, sont envoyés à C.G. Ehrenberg (Darwin, 1846). Ce dernier identifie de nombreuses formes d'organismes siliceux aquatiques (Diatomées, Radiolaires) mais également des tissus siliceux de plantes qu'il nomme *phytolitharia* et dont il dénombre 34 formes distinctes (Darwin, 1846). En 1843, Ehrenberg publie les premiers croquis de *phytolitharia* observés sur le continent américain. Cette décennie (1835-1845) marque le début des recherches sur l'origine botanique des particules de silice (Crüger, 1857 ; Von Mohl, 1861). C'est également à cette période qu'est proposé le nom « phytolithe » pour désigner ces particules (Ruprecht, 1866).

ii). Production des phytolithes

a). Provenance de la silice des phytolithes

La provenance de la silice constitutive des phytolithes dans les plantes peut être comprise par la physiologie végétale et le cycle biogéochimique continental du silicium.

La seule source disponible de silicium (Si) pour les plantes vasculaires correspond au réservoir continental issu de l'altération des roches silicatées. Le Si est l'élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène et qui, sous sa forme oxydée, prend le nom de silice (SiO₂), représentant ainsi plus de 75 % des roches exposées à la surface de notre planète. Cette silice, dissoute par l'hydrolyse des silicates, prend la forme de molécules d'acide silicique Si(OH)₄ qui,

associées aux solutions interstitielles des sols, peuvent être captées par les systèmes racinaires et souterrains des plantes (Fig 2.1). Certains travaux ont également suggéré que quelques plantes pourraient solubiliser la silice depuis des particules d'argile dans des solutions sans silice (McNaughton et Tarrant, 1983).

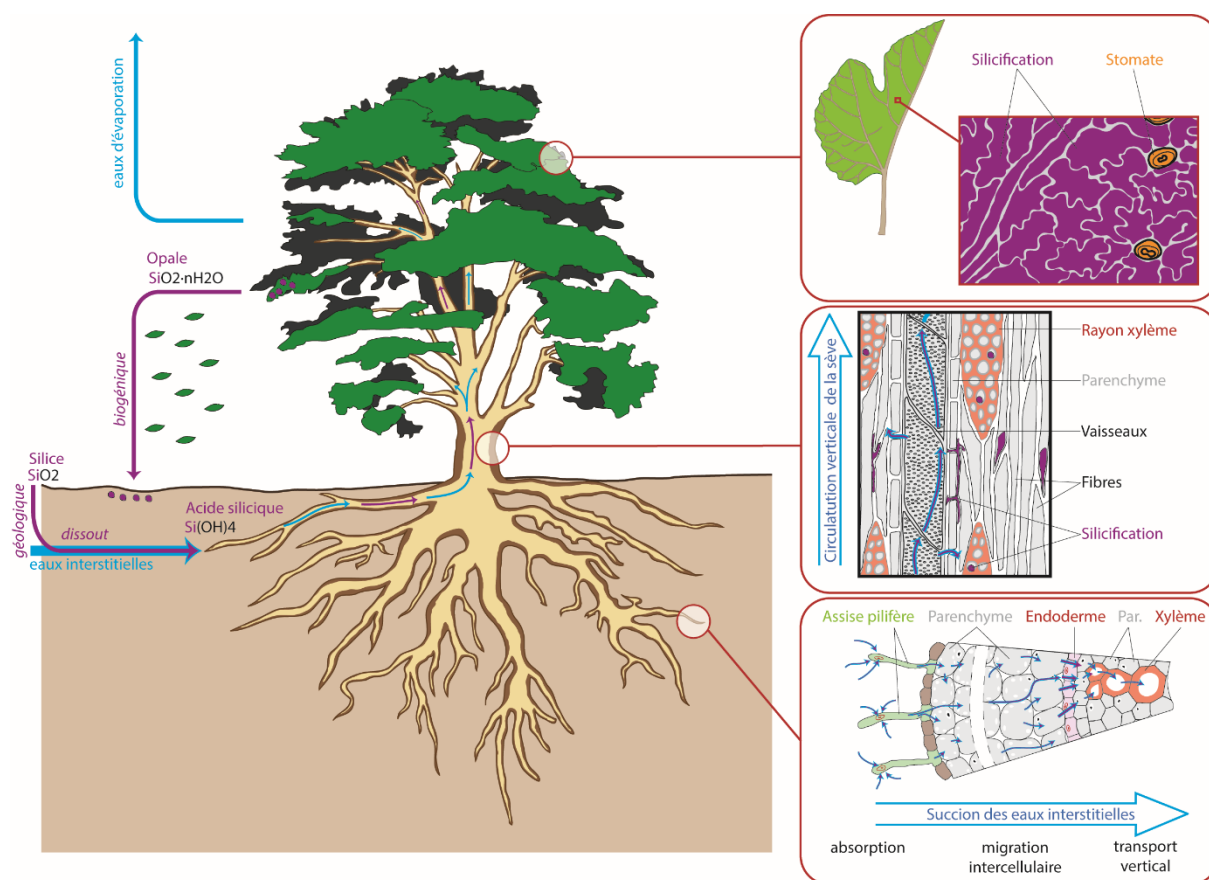


Figure 2.1 – Schéma des circulations de l'acide silicique et de l'eau du sol vers la plante, et leur implication dans la formation des phytolithes dans les tissus végétaux.

L'idée que les plantes continentales captent la majeure partie de la silice dissoute n'est pas récente (Erhart, 1963). La plupart des travaux réalisés depuis ont tous convergé vers le fait que les phytolithes correspondent à un réservoir important du silicium continental (Bartoli et Souchier, 1978 ; Lucas et al., 1993 ; Alexandre et al., 1997b ; Markewitz et Richter, 1998 ; Meunier, 2003 ; Derry et al., 2005). En 2002, Conley estime que seul 2 à 8% de la production annuelle continentale de silice dissoute parvient jusqu'à l'océan, pour une production annuelle fixée sous forme de phytolithe de 60 à 200.10¹² mole/an.

Ce différentiel, favorable à l'incorporation du silicium à la biosphère, implique également une source biogénique du silicium (Derry et al., 2005). En effet, le silicium, incorporé initialement sous la forme de phytolithe dans les plantes, n'est réintroduit dans le réservoir pédologique qu'à la nécrolyse complète (mort de la plante) ou partielle (feuilles, branches, etc....) de celles-ci (Powers-Jones et al., 1997 ; Piperno, 2006). La dissolution de cette silice biogénique par un mécanisme de réhydratation permet une réincorporation du silicium, sous sa forme acide

Si(OH)_4 , dans les solutions interstitielles des sols puis dans les plantes (Fig 2.1) (Alexandre et al., 1997b ; Derry et al., 2005).

b). Formation chimique des phytolithes

Les mécanismes d'incorporation et de transport de la silice dissoute par les plantes commencent à être bien connus. Dès 1965, Jones et Handreck montrent qu'il est possible de prédire, chez les Poaceae, la teneur en silice minéralisée d'une plante en fonction de la teneur en acide silicique du sol et de la quantité d'eau transpirée. Ce type de relation implique une circulation passive de la silice dans les plantes (Piperno, 2006). Ainsi, le processus débute avec l'absorption des eaux souterraines par les racines des plantes et leur transport vers les organes aériens, dans le flux de transpiration via le tissu conducteur d'eau et de sève, le xylème (Fig 2.1).

A l'inverse, en 1977, Parry et Winslow remarquent que l'absorption de la silice, chez le pois *Pisum sativum*, augmente après l'élimination des racines des plantules et reste faible en leur présence. Cette observation permet de mettre en avant un mécanisme de rejet ou de contrôle d'entrée de la silice dans les racines de certaines plantes. Ces processus d'absorption active ont par la suite été confirmés chez d'autres taxons comme les Cyperaceae, les Panicoideae, les Pooideae ou encore les Oryzoideae (Van der Vorm, 1980 ; Jarvis, 1987 ; Ernst et al., 1995). Ce contrôle implique une dépense métabolique où la silice absorbée peut être affectée à une fonction désignée (Piperno, 2006).

Habituellement, et en lien avec une circulation passive, la formation des phytolithes dans les tissus des plantes a été présentée comme résultante d'une accumulation de silice aux extrémités du système vasculaire (majoritairement au niveau des feuilles) où la perte d'eau par transpiration va minéraliser la silice par sursaturation de la solution (Raven, 1983). Piperno (2006) souligne que ce mécanisme, observé chez les Poaceae, a toutefois été généralisé abusivement aux autres producteurs de phytolithes. Cette généralisation laisse à penser que les phytolithes ne sont issus que de dépôts inertes et ne permet pas d'interpréter l'absorption active comme un contrôle de la silice par les plantes en lien avec des fonctions spécifiques. En effet, de nombreux taxons présentent des accumulations de phytolithes dans des tissus et cellules qui ne sont pas associées à la transpiration ou à la perte d'eau (Sangster et al., 2001). Ernst et al. (1995) montrent que, chez certaines Cyperaceae, la plante crée des vaisseaux qui canalisent uniquement la silice soluble vers des tissus végétaux désignés. Enfin, des travaux récents sur le génome de plantes, comme le maïs et les courges, ont permis de mettre à jour un contrôle génétique de la silicification des tissus pour des fonctions déterminées (Dorweiler et Doebley, 1997 ; Piperno et al., 2002).

c). Fonctions des phytolithes au sein des plantes.

Certaines plantes allouent une part de leur métabolisme au contrôle de l'absorption de silice. Ce mécanisme implique que les phytolithes soient associés à des fonctions nécessaires à ces plantes (Sangster et al., 2001 ; Cooke et Leishman, 2011 ; Strömberg et al., 2016). Parmi ces fonctions, l'une des plus mises en avant concerne la protection de la plante contre les différents types de stress.

Beaucoup d'études agricoles ont été menées sur les stress abiotiques. Elles s'intéressent aux rôles de la silice et des phytolithes dans l'atténuation des conditions défavorables des environnements à la croissance des plantes (Cocker et al., 1998 ; Neumann et Zur Nieden, 2001). Le silicium permet notamment de fixer ou de coprecipiter les ions métalliques, comme l'aluminium, et d'en réduire la toxicité (Sangster et al., 2001 ; Liang et al., 2007). La silicification de la surface des feuilles peut réduire de manière significative la perte d'eau par transpiration et réduire ainsi le stress hydrique (Eneji et al., 2008). Enfin, des travaux ont permis de montrer que l'émission thermique de la silice est efficace pour refroidir les feuilles et pour mieux tolérer la chaleur (Wang et al., 2005).

Les phytolithes participent également à la lutte contre le stress induit par les pathogènes et les prédateurs. Plusieurs études ont permis de montrer que l'acide silicique influe sur la production de composés antifongiques et antibactériens chez des plantes comme le riz, le blé, les Solanaceae ou encore les Cucurbitaceae (Chérif, 1994 ; Rémus-Borel et al., 2005 ; Heine et al., 2007). La formation concomitante de phytolithes et de lignine, dans les parois de certains fruits de courge, est associée à une préservation des graines et de la pulpe contre les insectes (Piperno et al., 2002). Il semblerait que les hautes teneurs en silice de certaines plantes puissent être captées par les insectes qui alors évitent leur ponte (Correa et al., 2005) ou la consommation de ces dernières (Reynolds et al., 2009 ; Hartley et DeGabriel, 2016). Cette pratique entraînerait une réponse, par silicification, de certaines populations de plantes aux populations de petits prédateurs (Massey et al., 2008). Il est également possible qu'une silicification trop importante de certaines plantes ait des effets négatifs sur leurs consommateurs tels qu'une usure des pièces buccales, une digestibilité réduite, une réduction de l'acquisition de nutriments (Massey et Hartley, 2006 ; Kvedaras et al., 2009).

Enfin, les phytolithes jouent un rôle important dans la structure cellulaire et le maintien vertical de certaines plantes peu ou non pourvues en lignine (dont de nombreuses monocotylédones). Pour exemple, les plantes du genre *Equisetum* sp., qui sont naturellement riches en phytolithes, ont tendance à flétrir lorsqu'elles poussent dans des solutions sans silice (Law et Exley, 2011). La silicification de certaines cellules du sclérenchyme permet un renfort du système vasculaire, ce qui indique également un rôle mécanique de la silice (Piperno, 2006). Il est à noter que la silice est plus lourde que des molécules comme la lignine. Cela entraîne une contrainte structurelle sur la plante qui pourrait expliquer des différences de stratégie et donc d'occurrence (Schoelynck et al., 2010).

2. Représentativité taxonomique des phytolithes

i). Lien entre les formes de phytolithes et les structures cellulaires

Une fois que l'acide silicique a pénétré, sous forme de gel de silice, dans le système vasculaire de la plante via le système racinaire, sa teneur croît en fonction du temps pour atteindre une valeur limite qui correspond au taux de saturation. Lorsque la concentration en acide silicique dépasse 0,140g/l (pour 25°C et pH < 9), la solution commence à former des composés condensés jusqu'à obtenir des polymères solides, comme l'opale amorphe $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Frayse, 2007). La précipitation de l'acide silicique se fait par fixation aux structures cellulaires en association avec les protéines, comme la callose ou la cellulose (Sangster, 1970).

Les dépôts de silice solide vont prendre des formes associées aux espaces intérieurs des cellules (la *lumina*), aux parois cellulaires et aux espaces intercellulaires (Piperno, 2006). Blackman (1969) observe que les cellules des feuilles de blé tendre (*Triticum aestivum*) perdent rapidement leur cytoplasme et leur noyau pour favoriser l'incorporation de silice. Chez de nombreuses familles monocotylédones, comme les Arecaceae, Costaceae, Musaceae ou encore les Cyperaceae, des silicifications internes ont également été observées (Prychid et al., 2003). La silicification des parois cellulaires et des espaces intercellulaires a également été mise en évidence chez différentes familles de plantes. Des formes de phytolithes allongés, pouvant atteindre de grandes dimensions et dépasser la centaine de micromètres, ont particulièrement été identifiées dans les espaces intercellulaires (Ball et al., 2009).

Ainsi, la silicification, inter ou intracellulaire, des différents tissus de ces nombreux taxons producteurs implique la présence d'une multitude de formes potentielles de phytolithes. Golokhvast et al. (2014) montrent qu'au sein du règne végétal des Angiospermes, la variation de taille entre les productions de phytolithes est d'un facteur 10 tandis que chez les Gymnospermes, elle est d'un facteur 4. Ils montrent également que la diversité des formes de silicification varie également entre ces deux grandes divisions végétales. Se pose alors la question du potentiel de ces objets à être des indicateurs taxonomiques.

ii). Biais taxonomiques : multiplicité et redondance

Piperno (2006) rapporte que, dès le début des années 1900, de nombreux scientifiques européens se sont effectivement intéressés à la question de la taxonomie des phytolithes. Ainsi, les recherches sur les plantes productrices de phytolithes se sont accumulées depuis un siècle et permettent aujourd'hui d'avoir une vision globale des phytolithes produits par les principales familles et ordres végétaux. Les premières classifications taxonomiques des phytolithes se sont initialement concentrées sur les productions des Poaceae (Prat, 1948 ; Twiss et al., 1969) et nous permettent d'illustrer, au sein d'une famille, comment s'organise la répartition des morphotypes de phytolithes.

Une des premières remarques sur les formes de phytolithes produites par les Poaceae est que chaque espèce produit un large éventail de morphologies distinctes, avec des variations de taille et de fréquence considérables pour chacune. Rovner (1971) nomme ce phénomène « **multiplicité** ». De plus, les espèces de Poaceae vont produire des phytolithes dont la morphologie est semblable d'une espèce ou d'un genre à l'autre et dont les caractères ne semblent pas permettre une distinction taxonomique entre elles. Cette réapparition de types identiques entre taxons apparentés ou non est nommée « **redondance** » (Rovner, 1971).

Ainsi, dès 1983, Rovner conclut que « *Contrairement aux pollens, qui ont des facteurs d'isolement reproductif contribuant au développement de palynomorphes distinctifs des espèces, les phytolithes sont conformes aux éléments structuraux* ». Si cette affirmation réfute la possibilité d'identifier, comme chez les pollens, une espèce ou un genre à partir d'une forme individuelle de phytolithe, elle indique toutefois que les structures cellulaires et biologiques communes, à des groupes plus inclusifs taxonomiquement (Famille, Classe, Ordre), peuvent toutefois fournir des phytolithes diagnostiques.

Cette observation a aussi été faite chez d'autres espèces de monocotylédones et chez les dicotylédones (Bozarth, 1992 ; Runge, 1999 ; Wallis, 2003 ; Piperno, 2006).

Les études statistiques et systématiques, réalisées sur les types de phytolithes produits par les Poaceae, en sont arrivées aux mêmes conclusions. Le codage précis des caractères des phytolithes, dans des analyses morphométriques et morphologiques, ne permet pas d'identifier des regroupements spécifiques ou génériques des producteurs (Barboni et Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017). Toutefois, ces études agrément la possibilité de réunir des morphotypes sous des groupes taxonomiques plus inclusifs (et donc moins informatifs). En revanche, ces mêmes études ont montré que les morphotypes pouvaient apporter des informations écologiques sur les formations végétales. Comme l'indique Rovner (1983), les classifications par distinction taxonomique ne sont pas applicables aux phytolithes. Il est donc nécessaire de réfléchir à un autre modèle de classification intégrant la diversité des formes de phytolithes mais qui valoriserait mieux l'information écologique qui leur est associée.

iii). Classification parataxonomique et phytolithes

La classification scientifique du monde vivant, dite phylogénétique, repose sur la systématique cladistique et a pour objectif de rendre compte des relations d'apparentement entre les taxons sur la base de leurs caractères (Lecointre et Le Guyader, 2006). Cette classification ne reconnaît que les groupes monophylétiques, c'est-à-dire des groupes comprenant tous les descendants d'un ancêtre et l'ancêtre lui-même (Hennig, 1966). Ainsi, de nombreux taxons, de l'ordre à l'espèce en passant par la famille, sont aujourd'hui redéfinis et formalisés selon cette systématique (Lecointre et Le Guyader, 2006). Si elle rejette les classifications traditionnelles et phénétiques jugées « gradistes », la classification phylogénétique conserve toutefois certains de leurs éléments, comme une nomenclature binominale latine reposant sur un code de

nomenclature (CIN = Code International de Nomenclature, pour les algues, les champignons et les plantes, <https://www.iaptglobal.org/>) pour nommer les espèces et les premiers rangs taxonomiques.

La majorité des descriptions d'espèces nouvelles, fossiles ou modernes, se fait dans une perspective phylogénétique et en respect des codes de nomenclature. Toutefois, dans certains cas, l'application d'une nomenclature reposant sur une systématique phylogénétique n'est pas possible. Lorsque des productions biologiques ou des traces d'organismes fossiles ne peuvent pas être attribuées directement à des taxons dans une perspective phylogénétique mais peuvent apporter des informations paléoécologiques, une taxonomie parallèle, nommée **parataxonomie**, peut être mise en place afin d'étudier et classifier ces éléments nommés parataxons (Tortosa, 2013). Ces parataxonomies reposent alors sur des nomenclatures propres permettant une identification et un référencement de l'élément fossile en question. À ce jour, des parataxonomies existent pour les traces fossiles (ichnofacies), les œufs fossilisés, les conodontes mais également les pollens mésozoïques.

De nombreuses plantes productrices de phytolithes sont connues et leurs morphotypes identifiés. En revanche, la redondance et la multiplicité des productions de phytolithes rendent cette relation non-réciproque. En d'autres termes, il n'est pas possible, pour la majorité des formes, d'identifier un phytolithe à un rang taxonomique plus précis que la famille. C'est cette inégalité qui a entraîné la construction d'une « **paranomenclature** » basée sur les morphologies des phytolithes et réalisée par l'*ICPN working group* (Madella et al., 2005 ; Neumann et al., 2019) (Fig 2.2). Pourtant, cette nouvelle nomenclature reste complémentaire de la classification phylogénétique du vivant, de la taxonomie et de la nomenclature botanique moderne. Je proposerai dans la sous-partie suivante d'y intégrer plutôt une dimension écologique à cette classification morphologique et ce, dans un souci d'interprétation des assemblages.

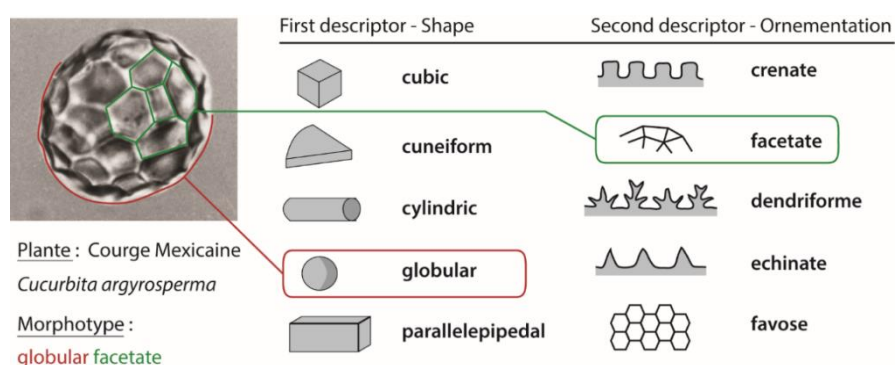


Figure 2.2 – Exemple d'application de la nomenclature de l'ICPN working group (Madella et al., 2005) à un morphotype de phytolithe identifié chez les cucurbitaceae.

Dans ce manuscrit, la nomenclature utilisée pour les phytolithes correspond à celle publiée en 2005 par Madella et al. (Fig 2.2). La dénomination d'un phytolithe repose d'abord sur un nom correspondant à sa morphologie en 2D ou 3D (ex : Globular, Cuneiform, Elongate, ...). La seconde partie du nom correspond au descripteur de la texture du morphotype (ex : facetate, echinate, crenate, ...). Un troisième descripteur peut faire référence à la localisation botanique de la

formation du morphotype, mais en dehors du cas des morphotypes dit « bulliformes », faisant déjà référence à un type de cellule, ce troisième descripteur est peu utilisé. Enfin, certains morphotypes ont conservé leur nom d'usage utilisé avant la construction de cette nomenclature, du fait qu'ils n'apportent aujourd'hui aucune confusion dans leur dénomination (ex : *cross*, *papillae*, *rondel* ...).

3. Classification morpho-écologique des phytolithes à l'usage de l'Amérique centrale

Comme on l'a vu précédemment, de nombreuses classifications ont essayé d'attribuer une signification taxonomique aux morphotypes de phytolithes (Twiss et al., 1969 ; Pearsall et Dinan, 1992 ; Piperno, 2006). La figure 2.3 montre que ces assignations taxonomiques sont réparties, pour la plupart des morphotypes, de la classe à la famille. Il me semble ici nécessaire de construire une classification où les morphotypes des nomenclatures internationales (Madella et al., 2005 ; Neumann et al., 2019) seraient autant associés à des types écologiques de plantes qu'à des groupes taxonomiques. Aussi, le tableau 2.1 résume les morphotypes de phytolithes référencés dans cette sous-partie, les taxons qui les produisent et les types écologiques de plantes auxquels ils sont associés.

- i). Les morphotypes des plantes arborées
 - a). Les *Globular* et *Hat shape*

Les formes sphériques à ellipsoïdales ont, pour la plupart, été décrites qu'après les années 50, les premières formes l'ayant été dans les cellules de parenchymes d'arbres dicotylédones (Geis, 1973 ; ter Welle, 1976). Ces premières observations ont notamment montré d'importantes différences dans l'ornementation de ces particules.

Une partie de ces formes sont regroupées sous le morphotype ***Globular smooth/psilate*** (Fig 2.4a-c). Il s'agit donc de formes sphériques, plus ou moins irrégulières, de taille relativement petite (2 à 25µm) et dont la surface lisse ne présente ni ornement ni aspérité. Elles ont été identifiées dans les cellules de feuilles et d'organes reproducteurs des principales familles de dicotylédones (Wilding et Drees, 1973 ; Piperno, 1988 ; Iriarte et Paz, 2009 ; Watling et Iriarte, 2013), de quelques monocotylédones et gymnospermes (Runge, 1999 ; Bremond et al., 2004 ; Piperno, 2006) mais également dans les cellules de bois et d'écorces de dicotylédones ligneuses (Collura et Neumann, 2017). Si ce morphotype est en effet distribué dans de nombreux groupes taxonomiques, il est tout de même utilisé pour désigner les dicotylédones non-herbeuses en raison de son abondance dans les ligneux (Strömberg, 2004 ; Neumann et al., 2019).

Une grande partie des phytolithes sphériques rencontrés est classée dans le morphotype ***Globular decorate/ornate*** (Fig 2.4d-f). Il s'agit de formes plus ou moins sphéroïdales, de taille petite à moyenne (3 à 30µm) et dont la surface complexe comprend une gamme variée d'ornementations : granuleuse, verruqueuse, crénelée, plissée, etc. (Madella et al., 2005).

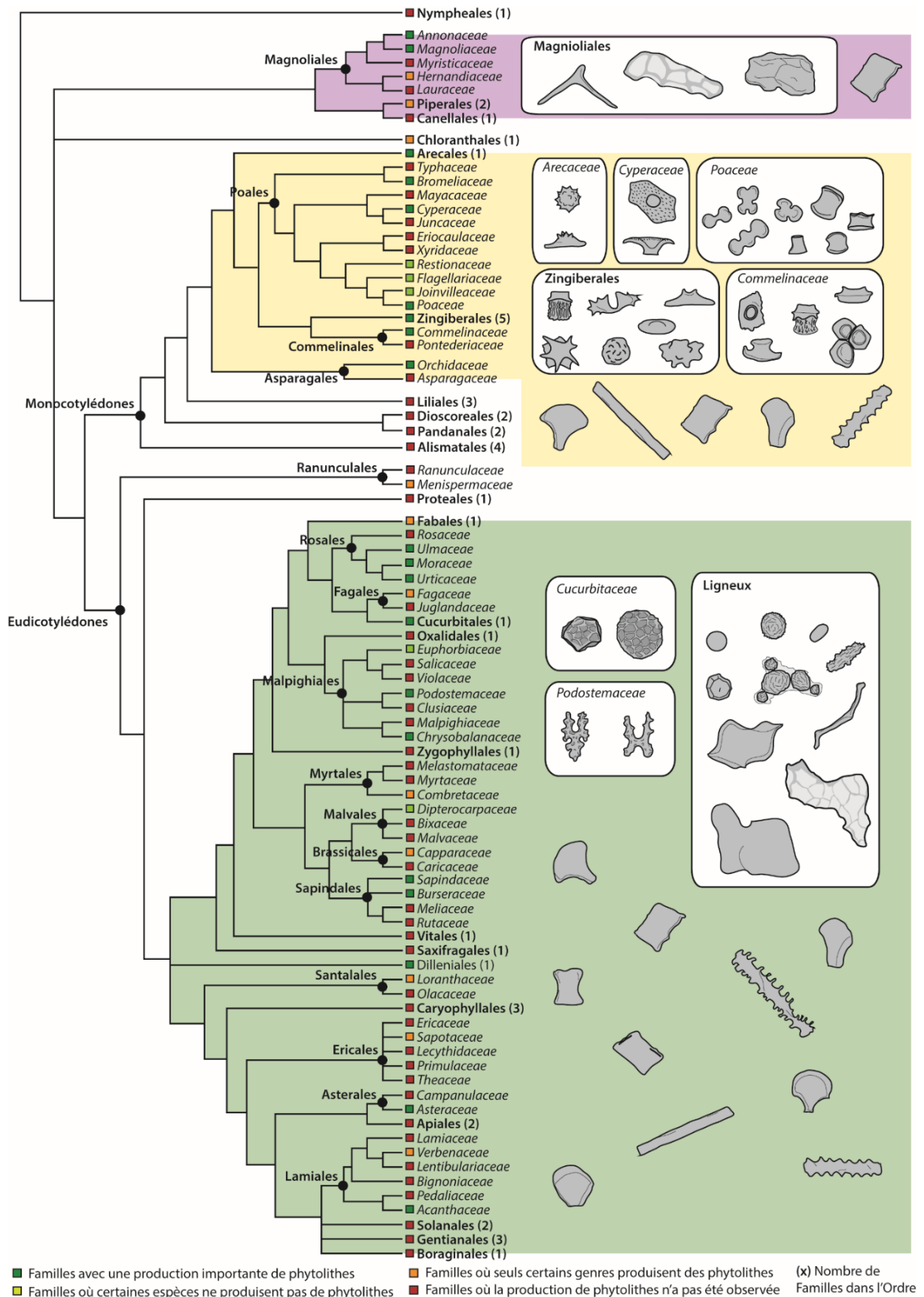


Figure 2.3 : Représentation du degré de production de phytolithes des Ordres et Familles (d'après, Piperno, 2006) retenus par la classification phylogénétique des angiospermes APG IV (Chase et al., 2016). Les morphotypes diagnostiques d'un rang taxonomique sont identifiés par un encadré nominatif, au contraire des formes non-diagnostiques.

Morphotype	Figure	Taille	Plante productrice	Organe product.	Traitement dans assemblage	Références	
Globular	Psilate	< 25 µm	Dicots L / Monocots	Bo / Ec / Fe / Or	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; 2006 ; Stromberg, 2004 ; Collura & Neumann, 2016	
	Decorate	> 30 µm	Dicots L / Monocots H	Bo / Ec / Fe / Fr	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; Alexandre et al., 1997 ; Collura & Neumann, 2016	
	facétate	> 20 µm	Cucur. / Annon. / Malva.	Fr / Fe	Courges / Cucur. rampantes	Runge, 1999 ; Piperno et al., 2000 ; Piperno 2006 ; Novello et al., 2018	
	picate / druse	> 30 µm	Zingibérales	Ti / Fe / Rz	Herbes zingibérales	Alburquerque et al., 2013 ; Chen & Smith, 2013 ; Benevenuto et al., 2015	
	verrucate	< 30 µm	Marantaceae	All	Herbes marantacées / Taro	Alburquerque et al., 2013 ; Chen & Smith, 2013 ; Chabot, 2017	
	Nodular	< 30 µm	Dicots L	Bo / Ec / Fe	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; Runge, 1999 ; Garnier, 2012 ; Collura & Neumann, 2016	
	Compound	< 30 µm	Dicots L	Bo / Ec	Arbres ligneux dicots	Garnier et al., 2013 ; Collura & Neumann 2016	
	Ellipsoid outgrowth	20 - 60 µm	Dicots L	Fe	Arbres ligneux dicots	Garnier et al., 2013 ; Chabot, 2017	
	Echinate	< 30 µm	Arecaceae / Bromeliaceae	All	Palmyers	Piperno, 2006 ; Fenwick et al., 2011 ; Thomas, 2011 ; Benevenuto et al., 2015	
	Hat Shape	< 25 µm	Arecaceae / Maran. / Orchi.	All	Palmyers	Piperno 1988 ; Kealhofer & Piperno, 1998 ; Thomas, 2011 ; Benvenuto et al., 2015	
	TSLP	Irregular psilate	> 30 µm	Dicots L / Magno.	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Stromberg, 2004 ; Collura & Neumann, 2016
		Irregular faceted	> 30 µm	Dicots L / Magno. / Pteri.	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Neumann et al., 2009 ; Collura & Neumann, 2016
		Irregular pitted	> 30 µm	Dicots L / Magno	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Dickkau et al., 2013 ; Collura & Neumann, 2016
	GSSCP	Bilobate	10 - 25 µm	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017
		scoped	10 - 20 µm	Onyzoideae	Fe / Fl	Riz / Oryzoideae	Pearsall et al., 1995 ; Lu & Liu, 2003 ; Gu et al., 2013 ; Neumann et al., 2017
Cross		8 - 30 µm	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Lu & Liu, 2003 ; Piperno, 2006 ; Neumann et al., 2017	
Triangle cross		8 - 20 µm	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017	
Polylobate		20 - 40 µm	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017	
Saddle		8 - 25 µm	Poaceae	Fe / Fl	Chloridoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Fredlund & Tieszen, 1994 ; Garnier et al., 2013 ; Neumann et al., 2017	
collapse		8 - 30 µm	Bambusoïdeae	Fe / Fl	Bambous	Garnier et al., 2013 ; Gu et al., 2016	
Rondel		6 - 20 µm	Poaceae	Fe / Fl	Graminées	Fredlund & Tieszen, 1994 ; Barboni & Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017	
three - pikes		6 - 20 µm	Bambusoïdeae	Fe / Fl	Bambous	Piperno & Pearsall, 1998 ; Pearsall et al., 2003 ; Gu et al., 2013	
half decorate		6 - 20 µm	<i>Zea sp.</i>	Fe / Fl	Téointe	Pearsall et al., 2003	
ruffle top		6 - 20 µm	<i>Zea sp.</i>	Fe / Fl	Téointe	Pearsall et al., 2003	
wavy top		6 - 20 µm	<i>Zea mays</i>	Fe / Fl / Fr	Mais	Bozarth, 1998 ; Pearsall et al., 2003	
Crenate		< 60 µm	Poaceae	Fe / Fl	Poïdes / graminées en C3	Fredlund & Tieszen, 1994 ; Barboni & Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2019	
Trapezoid		< 70 µm	Poaceae	Fe / Fl	Poïdes / graminées	Fredlund & Tieszen, 1994 ; Neumann et al., 2019	
Papillae		Fig 2.5av-be	10 - 40 µm	Cyperaceae	Fe / Gr	Herbes hygrophiles / cypéracées	Psilate
	Fig 2.6a-c	10 - 20 µm	Musaceae	All	Bananier	Prychid et al., 2003 ; Lentfer, 2009 ; Vrydaghs et al., 2009 ; Chen & Smith, 2013	
Cav.	Fig 2.6d-g	10 - 30 µm	<i>Heliconia sp.</i>	?	Balisier / <i>Heliconia sp.</i>	Prychid et al., 2003 ; Piperno, 2006 ; Iriarte et al., 2010 ; Chen & Smith, 2013	
	Fig 2.6i-r	20 - 40 µm	Commelinaceae / Maran.	Gr / Rz	Herbes monocots	Chandler-Ezell et al., 2006 ; Eichhorn et al., 2010 ; Dickkau et al., 2013	
Anisop.	Great	> 40 µm	Marantaceae	Gr	Herbes marantacées	Runge, 1999 ; Piperno, 2006	
	Outgrowth	> 20 µm	Marantaceae	Gr	Herbes marantacées	Runge, 1999 ; Watling et al., 2016	
Psm.	Cone top	20 - 30 µm	Commelinaceae	Gr	Herbes commelinacées	Eichhorn et al., 2010	
	Large top	20 - 30 µm	Commelinaceae	Gr	Herbes commelinacées	Eichhorn et al., 2010	
Bloc.	Psilate	20 - 150 µm	Gymnospermes / Angiosp.	All	Tous types de plantes	Piperno, 1988 ; Bozarth, 1992 ; Mulholland & Rapp, 1992 ; Collura & Neumann, 2016	
	Decorate	20 - 150 µm	Gymnospermes / Angiosp.	All	Tous types de plantes	Piperno, 1988 ; Mulholland & Rapp, 1992 ; Stromberg, 2004 ; Blinnikov, 2005 ; Pearsall & Dinan, 2002 ; Bremond et al., 2005a ; Madella et al., 2005 ; Piperno et al., 2006	
Elongate	Bulliform flabellate	20 - 200 µm	Cyperaceae / Poaceae	Fe	Herbes monocots	Twiss et al., 1969 ; Runge, 1999 ; Stromberg, 2004	
	Psilate	20 - 200 µm	Dicots / Monocots / Pinoph.	Bo / Ec / Fe / Ti	Tous types de plantes	Runge, 1999 ; Collura & Neumann, 2016	
	Striate	20 - 100 µm	Dicots L	Bo / Ec	Arbres ligneux dicots	Twiss et al., 1969 ; Stromberg, 2004 ; Honsaie et al., 2009 ; Galego & Distel, 2014	
	Decorate	20 - 200 µm	Angiosp. / Pinoph. / Pteri.	Bo / Ec / Fe	Tous types de plantes	Twiss et al., 1969 ; Lu & Liu, 2003 ; Gallego & Distel, 2014 ; Neumann et al., 2019	
	Echinate	20 - 200 µm	Poaceae / Marantaceae	Fe / Fl	Herbes monocots	Stromberg, 2004 ; Zhang et al., 2013 ; Novello & Barboni, 2015 ; Ball et al., 2017	

Bo = Bois Fe = Feuille Fr = Fruit Rz = Racine / Rhyzome All = Toute la plante
Ec = Écorce Fl = Inflorescence Gr = Graine Ti = Tige

L = Ligneux H = Herbes

Taxon abrégé = Angiospermes, Annonaceae, Arecaceae, Cucurbitaceae, Malvaceae, Marantaceae, Orchidaceae, Pteridophyte, Pinophyte

Cav. = Cavate Psm. = Prism Bloc. = Blocky
Anisop. = Anisopolar

Tableau 2.1 : *Classification des groupes de morphotypes et morphotypes principaux de Phytolithes adaptée à une étude de ces derniers dans les zones néotropicales des Amériques. Chacun des morphotypes décrits est associé à son origine botanique et biologique, ainsi qu'à la manière dont il est considéré dans les assemblages.*

D'autres morphes sont également associés à ce morphotype, comme les formes agrégées, **Globular compound** (Fig 2.4g-i) et/ou nodulaires, **Globular nodular** (Fig 2.4j-k) (Garnier et al., 2013 ; Collura et Neumann, 2017).

Ces formes sont trouvées dans les feuilles, les fruits, les branches, le bois et l'écorce de nombreuses dicotylédones ligneuses (Piperno, 1988 ; Alexandre et al., 1997a ; Kealhofer et Piperno, 1998 ; Barboni et al., 1999 ; Iriarte et Paz, 2009 ; Garnier et al., 2013 ; Collura et Neumann, 2017) ainsi que plus rarement dans certaines monocotylédones herbacées (Piperno, 2006 ; Albuquerque et al., 2013 ; Chen et Smith, 2013). Le morphotype *Globular decorate*, malgré une distribution taxonomique large, est également utilisé comme indicateur de la végétation ligneuse (Alexandre et al., 1997).

Des distinctions sont toutefois faites pour certaines formes dont la morphologie et l'assignation taxonomique sont clairement définies. Parmi celles-ci, on trouve les formes sphéroïdes avec des crêtes, parfois plissées ou avec un aspect ridé, nommées **Globular plicate** ou Druse (Fig 2.4o-p), qui sont produites par les familles de Zingibérales (Costaceae, Cannaceae et Marantaceae) et qui sont interprétées comme indicateurs de ces familles dans les assemblages, c'est-à-dire des monocotylédones herbeuses (Albuquerque et al., 2013 ; Chen and Smith, 2013). Certaines formes de *Globular decorate* présentent une texture granulaire avec des protubérances « verruqueuses » qui donne son nom au morphotype de **Globular verrucate** (Fig 2.4q-r). Ces formes sont produites en grande quantité dans les cellules de Marantaceae et sont donc considérées comme phytolithes diagnostiques de cette famille dans les assemblages (Albuquerque et al., 2013 ; Chen et Smith, 2013).

Les grandes formes sphériques à ellipsoïdes (> 20µm), dont la surface est ornementée de reliefs linéaires connectés en forme de facette, les **Globular faceted** (Fig 2.4l-m), en sont un autre exemple. Elles ont été particulièrement étudiées chez les courges domestiques, mais sont associées plus généralement aux Cucurbitaceae, des vignes dicotylédones rampantes pour la plupart (Piperno et al., 2000 ; Piperno, 2006). Il est à noter que certains grands phytolithes, de forme sphéroïde et présentant des facettes, ont ponctuellement été observés chez les Annonaceae (Runge, 1999) ou chez certaines familles de dicotylédones ligneuses comme les Malvaceae (Novello et al., 2018). Il est possible que ces formes globulaires et facettées soient des productions très particulières de TSLP Irregular facetate (voir ci-dessous).

Parmi les formes sphéroïdes à ornementation, l'**Ellipsoid outgrowth** (Fig 2.4n), décrit par Garnier et al. (2013), est quelque peu divergent des autres formes. Il a d'ailleurs été classé habituellement dans les groupes de « *Sclereid* » (Garnier et al., 2013 ; Chabot, 2017). Il s'agit d'une forme grossièrement ellipsoïde à cylindrique de très grande taille, de 20µm à 60µm, dont les côtés longs sont ornementés par des protubérances crénelées à arrondies. Comme son assignation initiale

aux phytolithes *Sclereid* le laisse penser, l'Ellipsoid outgrowth est produit par des arbres et arbustes dicotylédones (Garnier et al., 2013).

Le ***Globular echinate*** correspond à d'autres formes ornementées de *Globular*, qui sont isolées et considérées comme un morphotype à part (Fig 2.4s-v). Il s'agit également de formes sphéroïdes plus ou moins irrégulières, ne dépassant pas 30µm et ornementées de projections coniques donnant un aspect épineux aux morphes. Ces formes ont été identifiées dans la plupart des cellules des tissus et organes des Arecaceae, qui en produisent abondamment (Tomlinson, 1961 ; Piperno, 1988 ; Kealhofer et Piperno, 1998 ; Runge, 1999 ; Benvenuto et al, 2015). Certaines formes associées au morphotype *Globular echinate* sont également identifiées dans les cellules foliaires de Bromeliaceae (Benvenuto et al., 2015). Selon certains auteurs, une différence peut être faite entre les formes de Bromeliaceae, plus réduites (< 10µm) et d'Arecaceae, plus grandes (6 à 25µm) et avec des projections plus denses (Piperno, 2006 ; Benvenuto et al., 2015). Pour d'autres auteurs, il pourrait également être possible de discriminer les formes de *Globular echinate* au sein des Arecaceae sur différents paramètres morphométriques (Albert et al., 2009 ; Fenwick et al., 2011 ; Benvenuto et al., 2015). Si aujourd'hui ces morphotypes sont majoritairement interprétés comme marqueurs des Arecaceae dans les assemblages, il est également nécessaire de prendre en compte la richesse en Bromeliaceae des environnements néotropicaux dans l'interprétation des assemblages.

Le dernier morphotype, **Hat shape**, correspond à de petites formes hémisphériques, inférieures à 25µm, aplaties sur les marges et dont la partie centrale, bombée, est couverte par des projections épineuses (Fig 2.4w-z). Comme les *Globular echinate*, ces formes sont majoritairement trouvées dans toutes les cellules des tissus et d'organes d'Arecaceae (Tomlinson, 1961 ; Piperno 1988 ; Kealhofer et Piperno, 1998 ; Piperno, 2006 ; Thomas, 2011 ; Benvenuto et al., 2015). Ces formes ont également été trouvées dans les feuilles d'Orchidaceae et de Marantaceae (Benvenuto et al., 2015). Dans les assemblages, les morphotypes de Hat shape sont principalement interprétés comme indicateurs des Arecaceae (Dickau, 2013 ; Watling et Iriarte, 2013 ; Watling et al., 2016). Il pourrait également être indispensable d'évaluer la présence d'orchidées dans nos environnements néotropicaux afin de mieux contraindre l'interprétation des assemblages phytolithiques.

b). Les *Sclereid* ou TSLP (Tree Siliceous Large Phytolith)

En français, le mot *Sclereid* peut se traduire par sclérite et fait référence à l'un des deux types de cellules du sclérenchyme (tissu de soutien d'organes de végétaux, constitué de cellules mortes dont les parois sont épaissies par la lignine) qui sont de petite taille, généralement regroupées et qui participent à la rigidité de certains organes (Meyer et al., 2008). Toutefois, l'association des morphotypes de *Sclereid* avec l'organisation cellulaire des sclérites n'a été signifiée que tardivement.

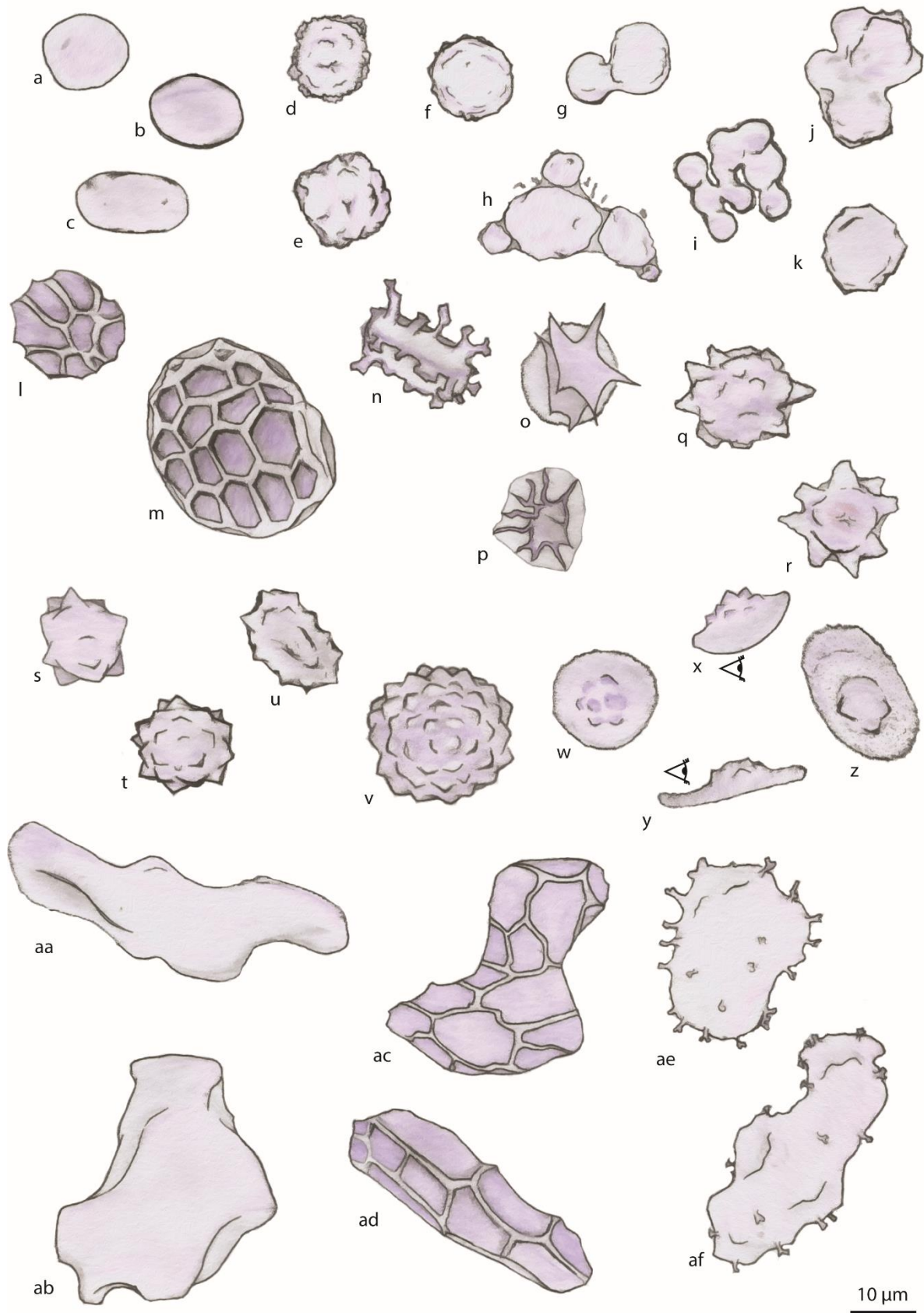


Figure 2.4 : Représentation graphique de différents morphotypes associés aux arbres et arbustes et aux *Arecaceae*. a-c Globular psilate ; d-f Globular decorate ; g-i Globular compound ; j-k Globular nodular ; l-m Globular faceted ; n Ellipsoid outgrowth ; o-p Globular plicate ; q-r Globular verrucate ; s-v Globular echinate ; w-z Hat shape ; aa-ab Irregular psilate ; ac-ad Irregular faceted ; ae-af Irregular pitted. Symbole œil = vue différente d'un morphotype

Pour exemple, Tucker (1977) rapporte des descriptions anciennes de sclérites (XIX^{ème} siècle) de Magnoliaceae et représente une grande diversité de morphologies cellulaires chez une cinquantaine d'espèces de Magnoliaceae. S'il relate la présence de « pierres » dans l'épiderme de certaines de ces espèces, elles n'y sont pas décrites. En 1981, Postek décrit des silicifications de cellules correspondant à celles illustrées dans Tucker (1977). D'ailleurs, parmi les formes décrites, certaines sont également associées à des trachéides (Postek, 1981).

À la suite de cette association, je vois plusieurs problèmes à l'utilisation du terme *Sclereid* pour désigner un groupe de morphotypes de phytolithes. Les *Sclereid* sont souvent considérés comme indicateurs de dicotylédones ligneuses dans différentes classifications (Strömberg, 2004 ; Piperno et al., 2006 ; Neumann et al., 2009 ; Collura et Neumann, 2017). Pourtant, le sclérenchyme et les sclérites sont également présents chez les monocotylédones ou chez des angiospermes basaux (Meyer et al., 2008). Pour exemple, comme on vient de le voir dans le paragraphe précédent, les *Sclereid* ont été décrits initialement dans les tissus de Magnoliaceae (Postek, 1981) mais également d'Annonaceae (Kealhofer et Piperno, 1998) qui font partie des Magnoliales, groupe frère des Monocotylédones et des Eudicotylédones (Fig 2.3). Si Collura et Neumann (2017) ont réussi à isoler les phytolithes de différents tissus végétaux, dont du sclérenchyme, cette démarche n'est toujours pas menée et l'application du nom *Sclereid* à certains morphotypes n'est pas forcément liée au sclérenchyme. Pour exemple, la forme de *Sclereid Cylindric geniculate psilate* de Garnier et al. (2013) est associée à la forme *Phytolith of vein sheath cell* de Postek (1981) qui est formée dans du parenchyme. Ces différents exemples laissent à penser que l'application du terme *Sclereid*, pour désigner les phytolithes de dicotylédones ligneuses ou tout simplement ligneux, porte à confusion tant taxonomiquement, biologiquement qu'écologiquement. D'ailleurs, le tableau 2.2 illustre l'évolution de la perception des morphotypes de *Sclereid* ou de phytolithes associés aux dicotylédones ligneuses depuis Postek (1981) et montre l'irrésolution de ces classifications. Ainsi, je présente ici différents morphotypes que je regroupe sous l'acronyme TSLP pour Tree Siliceous Large Phytolith. Cette désignation limite les confusions et donne une information écologique. Les TSLP regroupent donc l'ensemble des grandes formes de phytolithes, supérieures à 20µm, qui vont être uniquement produites par des arbres appartenant aux différents clades d'Angiospermes et de Gymnospermes (Tab 2.2).

Les premières formes classées dans les TSLP sont les **Irregular psilate** (Fig 2.4aa-ab). Il s'agit de morphes de grande taille, en général supérieurs à 30µm, en trois dimensions, à la surface lisse et sans ornementation, dont les contours peuvent être à la fois courbes et/ou linéaires formant à leurs croisements de nombreux angles ou arrondis (Tab 2.2). Certaines formes sont plutôt allongées (Strömberg, 2004 ; Chabot, 2017), ramifiées ou non (Postek, 1981 ; Piperno, 1988), avec parfois des terminaisons effilées (Runge, 1999). Certaines de ces formes prennent des aspects plus compacts où il est difficile de déterminer une orientation (Strömberg, 2004 ; Garnier et al., 2013 ; Collura et Neumann, 2017 ; Chabot, 2017) et peuvent parfois prendre une allure de polyèdre (Runge, 1999 ; Garnier et al., 2013 ; Chabot, 2017). L'absence de formalisation précise de la morphologie de ces différents phytolithes me pousse à imaginer de nombreuses formes de transition difficilement classables sans ambiguïté.

Postek, 1981	Piperno, 1988 Piperno, 2006	Runge, 1999	Stromberg, 2004	Neumann et al., 2009	Garnier et al., 2013	Watling et al., 2016	Collura & Neumann, 2016	Chabot, 2017	Taille	DL	DH	Mo	Ma	Pi	Pt	TESTÉ, 2020
Elongate and curve shape	Elongate and curve shape				Cylindric geniculate psilate	Sclereid			30 - 200 µm	x		x				
		Irregular with smooth surface			Polyhedral psilate		Sclereid psilate	Polyhedral psilate	20 - 90 µm	x						
		Elongate phytolith with tapering end	Elongate/irregular shapes		Irregular psilate shape			Irregular psilate	30 - 150 µm	x						Irregular psilate
		Irregular with surface stippled						Elongate psilate	30 - 250 µm	x						
		Elongate phytolith point-shaped							40 - 250 µm	x	?					
Cylindric pitted shape		Elongate faceted				Irregular stipulate tracheid	Sclereid pitted	Sclereid pitted	20 - 400 µm	x			x			Irregular pitted
	Elongate faceted shape			Elongate faceted	Cylindric faceted	Echinate tracheid			20 - 500 µm	x						
		Thin branched thick		Elongate faceted		Elongate faceted	Elongate faceted	Cylindric faceted	35 - 200 µm	x		x				
				Irregular branched thick					30 - 120 µm	x	?					Irregular faceted
	Irregular faceted shape	Spherical to oval faceted		Polyhedral faceted				Multifaceted polyhedral	25 - 200 µm	x			x			
	ellipsoid faceted shape			Globular large with faceted		Irregular faceted			25 - 90 µm			x				Globular faceted
		Elongate phytolith annular/spiral							20 - 500 µm	?			?	?		Decorate tracheid
		Smooth elongate with diagonal lines							100 - 800 µm	x						Elongate ribbed
Sinuou or lobate large shape	Anticlinal	Puzzle piece phytolith	Jigsaw-puzzle		Ellipsoid with outgrowth	UID	Fibre pitted	Ellipsoid with outgrowth	20 - 60 µm	x						Ellipsoid with outgrowth
	Polyèdre		Blocky polyhedron	Blocky polyhedron		Anticlinal epidermis	Blocky		20 - 250 µm	x		x	x	x	x	Jigsaw phytolith
		Platelets				Asteraceae platelet			20 - 200 µm	x		x	x	x	x	Blocky
									70 - 200 µm							Platelet

DL = Dicotylédones Ligneuses DH = Dicotylédones Herbeuses Mo = Monocotylédones Ma = Magnolioidées Pi = Pinophytes Pt = Pteridophytes

vert = morphotype TSLP violet = autre classe diagnostique rouge = non diagnostique

Tableau 2.2 : Évolution des descriptions de morphotypes habituellement classés comme ‘Sclereid’ et indicateurs des dicotylédones ligneuses. Proposition d’une nouvelle classification morphotypique.

Je préfère ainsi considérer l'ensemble de ces formes sous un seul morphotype, nommé *Irregular psilate*, regroupant toutes les formes décrites ci-dessus (Tab 2.2). Pour exemple, le morphotype *Cylindric/Elongate geniculate psilate*, décrit par Neumann et al. (2009) et Garnier et al. (2013), est très proche des formes décrites comme *Sclereid elongate* par Postek (1981) ou Piperno (1988), qui sont marquées par une forme allongée courbe torsadée et parfois ramifiée, elles-mêmes difficilement différenciables des formes allongées proposées par Piperno (2006). La plupart des formes décrites ont été identifiées comme produites par des arbres dicotylédones et ce, dans différents tissus (parenchyme, mésophylle, sclérenchyme). Le morphotype *Irregular psilate* peut donc être considéré comme indicateur des dicotylédones ligneuses. Encore une fois, l'absence de formalisation, morphologique et ornementale, du morphotype pourrait entraîner une confusion avec une accumulation ou une recristallisation aléatoire d'opale de silice. Ce biais peut être anticipé/contrôlé par l'étude locale et moderne des dicotylédones ligneuses de la zone d'étude.

Parmi les autres formes caractéristiques des TSLP, on retrouve des formes générales également irrégulières mais dont l'ornementation permet une meilleure identification. Ces formes très variables morphologiquement, pour ne pas dire irrégulières, sont regroupées sous le morphotype **Irregular faceted** (Fig 2.4ac-ad). Les formes décrites sont généralement en trois dimensions et de grande taille, en moyenne supérieures à 30µm. Leur surface est ornementée par un réseau de lignes en relief qui forment des polygones, ornementation dite facettée. Les premières formes décrites sont globalement allongées, d'une épaisseur plus ou moins marquée et plus ou moins courbes, notamment au niveau des terminaisons (Postek, 1981 ; Piperno, 1988). Certaines de ces formes allongées peuvent également être ramifiées (Garnier et al., 2013). Des formes plus compactes ou plus larges ont également été décrites à de nombreuses reprises mais sans formalisation particulière du morphe (Piperno, 1988 ; 2006 ; Runge, 1999 ; Neumann et al., 2009 ; Chabot, 2017). Les formes « branched », décrites par Neumann et al. (2009) et Garnier et al. (2013), pourraient également être décrites comme des formes facettées appartenant aux *Irregular faceted*. La plupart de ces formes facettées ont été décrites comme produites par des arbres Magnoliidae (Annonaceae, Magnoliaceae) et Dicotylédones (Tab 2.2), et pourraient donc en être indicateur dans les assemblages. On notera toutefois que les formes les plus sphéroïdes et facettées sont générées principalement par les Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000 ; Piperno, 2006). Certaines formes « geniculate » et facettées pourraient également être produites par certaines espèces de fougères (Testé et al., 2020).

Les **Irregular Pitted** (Fig 2.4ae-af) sont d'autres formes assez irrégulières, classées comme TSLP, qui sont caractérisées par une ornementation de type baculate ou papillar (Neumann et al., 2019). Il s'agit de grands phytolithes, généralement supérieurs à 30µm, dont la forme peut être allongée (Postek, 1981 ; Collura et Neumann, 2017), polygonale (Chabot, 2017) à large (Runge, 1999). Ces formes ont été identifiées dans des arbres Magnoliaceae et Dicotylédones, et sont donc considérées comme produites par ces taxons et indicatrices dans les assemblages. Neumann et al., (2019) considèrent que les formes allongées sont différenciables des formes allongées et ponctuées des trachéides par le type d'ornementation, les formes allongées pitted ne présentant pas d'ornementation pilate. Le morphotype *Irregular pitted* est généralement

moins présent dans les assemblages des publications que les autres formes de TSLP citées précédemment (Tab 2.2).

Cette classification très inclusive des « *Sclereid* » ou « woody trees phytoliths » a pour but d'homogénéiser et de formaliser ce groupe de phytolithes qui a beaucoup varié en fonction des différents travaux (Tab 2.2). La réduction du nombre de morphotypes et de la diversité des caractères devrait permettre de réduire les différences d'identification et d'interprétation des morphotypes entre auteurs.

- ii). Les morphotypes associés aux herbacées
 - a). Les GSSCP (Grass Silica Short Cell Phytoliths)

Les morphotypes classés dans ce groupe des GSSCP sont, comme leur nom l'indique, des phytolithes de taille relativement réduite, de 5 à 30µm, qui sont des cellules courtes siliceuses, formées majoritairement dans les cellules de l'épiderme des Poaceae. Toutefois, cette dénomination cache la grande diversité morphologique de ces phytolithes, qu'il est alors nécessaire de détailler. L'International Committee for Phytolith Taxonomy (Neumann et al., 2019) discrimine les morphotypes de GSSCP sur la base de caractères morphologiques homologues : leur morphologie générale et la forme et l'ornementation de leurs deux faces principales, interne et externe, à la surface des cellules de l'épiderme. Il y est rapporté que la face externe (OPS, *Outer Periclinal Surface*) est généralement plus grande que la face interne, concave dans quelques cas, et avec une surface lisse. La face interne (IPS, *Inner Periclinal Surface*) est souvent plus petite que l'OPS et prend des formes et des ornements divers. L'orientation de ces faces par rapport à leur position dans la cellule est également un caractère de discrimination.

Les lobés (Lobate)

Parmi les phytolithes de GSSCP, on trouve de nombreuses formes qui présentent des lobes et qui sont classées dans différents morphotypes dits « lobés ». Parmi ceux-ci, on trouve les formes regroupées sous le nom de ***Bilobate*** (Fig 2.5a-k). Il s'agit de phytolithes de forme allongée, de 10 à 25µm, dont les deux extrémités sont composées d'un lobe à la morphologie variable. La structure bilobée est assurée par la face externe qui est constituée de deux lobes reliés par une tige formée par les contraintes cellulaires. Les extrémités lobées de cette face OPS peuvent former des lobes complets ou échancrés, ronds à aplatis, pouvant être différents d'une extrémité à l'autre. La face interne peut prendre une grande diversité de formes, allant d'une crête pincée à une forme bilobée semblable à la face externe. La combinaison de ces caractères entraîne la multiplication des formes de *Bilobate*, largement illustrées dans la littérature (Piperno et Pearsall, 1998 ; Lu et Liu, 2003 ; Novello et al., 2012). Initialement, les *Bilobate* ont été décrits comme caractéristiques des Panicoideae (Twiss et al., 1969) mais sont en réalité produits par la quasi-totalité des sous-familles de Poaceae (Piperno, 2006 ; Rudall et al., 2014). Cette multiplication des classes de formes a mené certains chercheurs à en faire des indicateurs taxonomiques des

sous-familles de Poaceae (Piperno et Pearsall, 1998 ; Piperno, 2006 ; Rudall et al., 2014). Les travaux morphométriques et statistiques menés sur les Poaceae africaines ont montré que ces délimitations n'étaient pas significatives (Barboni et Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017). Alors que Barboni et Bremond (2009) suggèrent que la prolifération des formes réduit les effets de la redondance taxonomique au sein des sous-familles de Poaceae, d'autres chercheurs affirment que le développement d'un système de classification complexe, avec des caractères non objectifs et donc difficiles à reproduire entre auteurs, a conduit à une augmentation des différentes formes et donc, à des erreurs dans l'interprétation des ensembles (Rovner, 1971 ; Neumann et al., 2017). Neumann et al. (2017) proposent une classification basée sur les caractères morphométriques (longueur totale du morphotype, longueur de la tige). Plus facile à reproduire, ce mode de classification pourrait également permettre de signer certains paramètres environnementaux (Barboni et Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017).

Un seul morphotype, ***Bilobate scooped*** (Fig 2.5l), est considéré comme caractéristique d'un groupe taxonomique, les Oryzoideae. Ce morphotype porte son qualificatif en raison de sa première description par Pearsall et al. (1995) comme une forme « *dumbbell* [bilobate] *with scooped ends* » (comprendre aux extrémités creusées par une cuillère à glace). Neumann et al. (2017) décrivent le morphotype comme un *Bilobate* de taille moyenne, dont l'OPS ne présente pas clairement de tige séparant les lobes mais plutôt une concavité des côtés, et dont l'IPS présente une tige très fine avec des lobes angulaires à elliptiques, aux bords incurvés vers le haut et aux extrémités incurvées vers le bas. C'est notamment cette courbure des extrémités qui donne cet aspect creusé au microscope optique (Neumann et al., 2017). Neumann et al. (2017) proposent que le qualificatif « scooped » fasse référence à « *the upper part of the phytolith which looks like a double-scoop* » (ici comprendre cuillère ou pelle). Ce morphotype est uniquement identifié dans les plantes Oryzoideae d'Asie (Gu et al., 2013), d'Afrique (Garnier, 2013 ; Neumann et al. 2017) ou d'Amérique (Lu et Liu, 2003 ; Iriarte et Paz, 2009 ; Yost and Blinnikov, 2011).

D'autres types de formes lobées sont classés sous le morphotype ***Polylobate*** (Fig 2.5s-x). Il s'agit de formes allongées de grande taille, entre 20 et 40 μ m, dont les deux extrémités sont constituées d'un lobe et dont le corps central présente au moins un lobe fixé. L'OPS possède une forme lobée tout comme l'IPS, même si la face interne peut être plus petite, moins définie voire ornementée (Neumann et al., 2019). Tout comme les *Bilobate*, ces formes ont initialement été considérées comme propres aux Panicoideae (Twiss et al., 1969). Toutefois, ces formes apparaissent dans de nombreuses autres sous-familles de Poaceae (Piperno et Pearsall, 1998 ; Fahmy, 2008 ; Barboni et Bremond, 2009 ; Novello et al., 2012). Neumann et al. (2017) préconisent de classer l'ensemble des formes sous un seul morphotype Polylobate. Ce morphotype est considéré comme indicateur taxonomique des Poaceae.

D'autres formes lobées sont réunies sous le morphotype ***Cross*** (Fig 2.m-p). Il s'agit de formes multilobées, de taille petite à moyenne, de 8 à 30 μ m, avec au moins trois lobes, mais le plus souvent quatre, qui sont répartis selon une symétrie radiaire. Cela implique que les formes générales prises par ces phytolithes présentent des longueurs et largeurs équidistantes, notamment pour les formes quadrilobées.

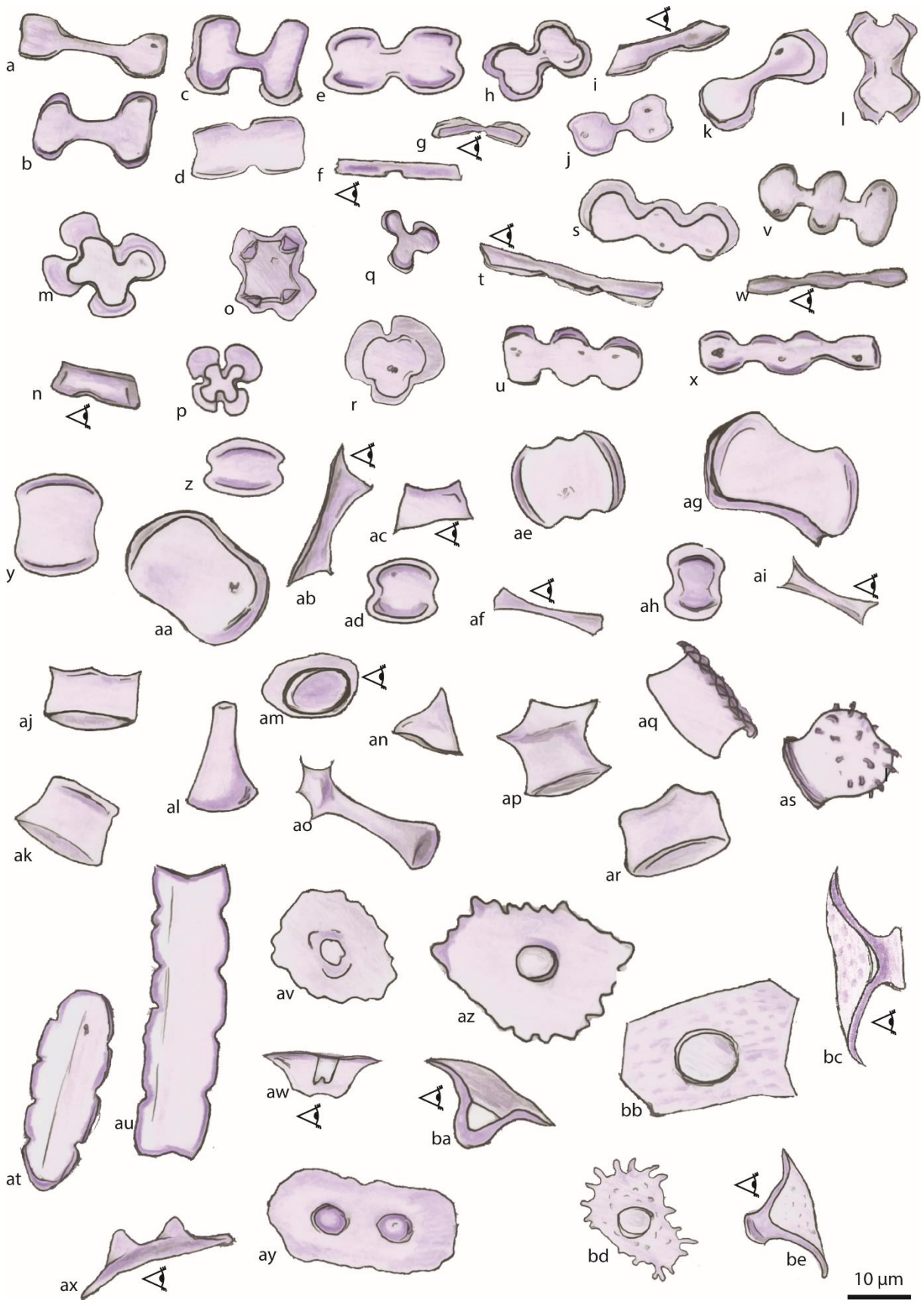


Figure 2.5 : Représentation graphique de différents morphotypes associés aux herbacées. a-k Bilobate ; l Bilobate scooped ; m-p Cross ; q-r Triangle cross ; s-x Polylobate ; y-ai Saddle ; aj-an Rondel ; ao-ap Rondel three-pikes ; as Rondel half decorate ; aq Rondel ruffle top ; ar Rondel wavy top ; at-au Crenate ; av-be Papillae. Symbole œil = vue différente d'un morphotype

Neumann et al. (2019) considèrent que la longueur d'un *Cross* est au maximum 1,3 fois supérieure à sa largeur. Comme chez les autres morphotypes de *Lobate*, la forme générale multilobée du morphotype est constituée par l'OPS tandis que la face interne, l'IPS, peut prendre de nombreuses formes qui varient en taille, en morphologie ou encore en ornementation.

Comme chez les *Bilobate*, ces combinaisons de morphologie entraînent une grande diversité de formes qui ont parfois été classées comme des morphotypes distincts. Initialement, les *Cross* étaient considérés comme caractéristiques des *Panicoideae* (Twiss et al., 1969), avant que certaines formes soient indiquées comme représentatives des *Bambusoideae* (Piperno et Pearsall, 1998) puis que régulièrement, d'autres formes soient notées dans de nouvelles sous-familles (Lu et Liu, 2003 ; Fahmy, 2008 ; Piperno, 2006). Afin de limiter la multiplication de morphotypes aux caractères peu formalisés, Neumann et al. (2017) préconisent une classification morphométrique basée sur des classes de longueur des côtés, généralement équidistants. Cette classification devrait permettre de suivre des conditions environnementales tout en ayant des critères d'application simples à reproduire. Dans les zones de tropiques américains, l'application d'un critère de taille aux formes de *Cross* permet également l'identification du maïs (Pearsall, 1978 ; Pearsall and Piperno, 1990 ; Iriarte, 2003). Neumann et al. (2017) classent également les formes trilobées radiaires comme un morphotype à part, ***Triangle Cross*** (Fig 2.5q-r).

Les Saddle, Rondel, Crenate et Trapezoid

Parmi les GSSCP, d'autres morphotypes ne présentent pas de lobes, tout en possédant l'ensemble des caractères propres à ce groupe. Parmi ceux-ci, on retrouve le morphotype ***Saddle*** (Fig 2.5y-ai) qui regroupe des formes relativement petites, de 8 à 20 μ m, dont l'OPS et l'IPS présentent, dans la majorité des cas, des tailles et des formes semblables, carrées à allongées. Ces deux faces présentent des côtés concaves mais des extrémités convexes ce qui leur confèrent une morphologie semblable à une « selle », d'où provient le nom du morphotype (Neumann et al., 2019). Cette morphologie principale se décline au moins en trois variations morphologiques. Ainsi, dans le cas des *Saddle tall*, les côtés concaves sont généralement plus grands que les extrémités convexes alors que les *Saddle squat* ont des côtés convexes plus grands et marqués par rapport aux côtés concaves (Pearsall et Piperno, 1998 ; Garnier et al., 2013). Certaines formes observées de côté présentent des faces très différentes, en général, une concave et une autre avec une extrémité anguleuse et sont nommées *Saddle collapse* (Garnier et al., 2013 ; Gu et al., 2016). Initialement, les formes de *Saddle* étaient associées aux *Chloridoideae* dans lesquelles elles ont été décrites (Twiss et al., 1969 ; Fredlund and Tieszen, 1994). Les travaux récents ont depuis montré que ces formes se retrouvent dans la plupart des sous-familles de *Poaceae* et n'ont donc pas une portée taxonomique plus précise (Barboni et Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017). Ainsi, la présence du morphotype *Saddle* dans les assemblages doit donc être considérée comme un indicateur de *Poaceae*. Neumann et al. (2019) indiquent que le morphotype peut être interprété comme indicateur de *Chloridoideae* après une étude moderne de la végétation. Pour certains auteurs, les ***Saddle collapse*** sont un indicateur taxonomique plus précis, du fait qu'ils sont uniquement produits par les *Bambusoideae* (Garnier et al., 2013 ; Gu et al., 2016) et sont donc à discriminer dans les assemblages.

Le morphotype **Rondel** (Fig 2.5aj-an), classé également parmi les GSSCP, représente l'ensemble des petites formes, inférieures à 20µm, grossièrement semblables à un cylindre. L'OPS est généralement plane, avec une forme variant d'un cercle à un ellipsoïde. L'IPS peut en revanche prendre une très grande diversité de formes et de tailles. Elle peut être anguleuse, pincée, circulaire ou encore présenter une ornementation plus ou moins dense et elle possède une gamme de tailles très variables, pouvant être plus petites, égales à plus grandes que l'OPS (Neumann et al., 2019). Le corps des *Rondel*, qui relie les deux faces, peut être également très variable dans sa hauteur, son épaisseur et donc dans sa morphologie (droite, concave, convexe). Sous microscope optique, en fonction de l'orientation du morphotype, une forme peut prendre un aspect circulaire (vue de face) à cylindrique (vue de côté). Initialement, les *Rondel* ont été principalement décrits dans les cellules de Pooideae et ont été considérés comme diagnostiques de cette sous-famille (Twiss et al., 1969 ; Fredlund and Tieszen, 1994). Depuis, ces formes ont été décrites dans la plupart des sous-familles de Poaceae (Piperno, 2006 ; Barboni et Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017), nous poussant à percevoir le *Rondel* comme un phytolithe indicateur des Poaceae. Barboni et Bremond, 2009 et Neumann et al., 2019 proposent que la grande variabilité des formes de *Rondel*, liée à la connaissance des communautés d'herbes locales, pourrait permettre de diviser plus finement les morphotypes pour une meilleure résolution taxonomique. C'est notamment vrai dans les tropiques américains pour certaines plantes, comme les bambous et les espèces du genre *Zea* sp. (dans lesquelles sont classées les téosintes et leur forme domestiquée, le maïs). Une forme nommée *Rondel three-spiked* (Fig 2.5ao-ap), dont l'IPS est pincée, en forme de crête avec trois épines, se trouve uniquement chez les bambous (Piperno et Pearsall, 1998 ; Pearsall et al., 2003 ; Gu et al., 2013). Trois types de *Rondel* ont été décrits comme diagnostiques du genre *Zea* sp. (Pearsall et al., 2003). La forme *Rondel half-decorate* (Fig 2.5as), composée d'une IPS bombée et ornementée de projections en forme de perles, et la forme *Rondel ruffle top* (Fig 2.5aq), dont l'IPS forme un ruché, ont été identifiées dans la plupart des espèces du genre *Zea* sp.. La forme *Rondel wavy-top* (Fig 2.5r), dont l'IPS présente une crête en forme de vague, ne se retrouve quant à elle que chez l'espèce *Zea mays* (Bozarth, 1998 ; Pearsall et al., 2003). Ces morphotypes peuvent être pris en compte dans l'étude des assemblages.

Le morphotype **Crenate** (Fig 2.5at-au) est, en général, moins cité dans les principaux GSSCP. Il regroupe des formes dont l'OPS, pouvant atteindre 60µm, prend un aspect sinueux à crénelé, et qui se distingue de l'OPS des *Polylobate* par une forme générale plus rectangulaire (Neumann et al., 2019). L'IPS est généralement plus petite et de forme rectangulaire (Fredlund and Tieszen, 1994) avec parfois des sinuosités ou une ornementation (Neumann et al., 2019). Initialement, cette forme était considérée comme produite par les Pooideae (Fredlund et Tieszen, 1994). Les travaux menés par Barboni et Bremond (2009) montrent également que la plupart des formes, qu'ils nomment eux *Trapezoid sinuate*, sont majoritairement produites par des espèces de Pooideae, même si certaines formes sont présentes chez les Bambusoideae, les Panicoideae et les Chloridoideae. Les auteurs considèrent le morphotype Crenate (*Trapezoid sinuate*) comme indicateur des Pooideae et des plantes en C3. Une forme particulière de Crenate, les **Trapezoid**, a récemment été classée comme un morphotype de GSSCP à part (Neumann et al., 2019). Il s'agit

de formes assez grandes, jusqu'à 70µm de longueur, dont l'OPS et l'IPS (généralement plus petite) forment deux faces rectangulaires, avec les côtés longs parallèles et dont les extrémités peuvent être droites à convexes. L'IPS, la plupart du temps lisse et étant plus petite, explique la forme trapézoïdale dans toutes les sections (Neumann et al., 2019). Elle est également décrite dans les Pooideae par Fredlund et Tieszen (1994) mais se retrouve dans d'autres taxons parmi les Poaceae (Neumann et al., 2019). Dans les assemblages, ces phytolithes peuvent être associés aux Pooideae avec un minimum de surveillance de la végétation typique de la région.

b). Les *Papillae* ou Sedge Cone Phytolith

Les phytolithes désignés comme ***Papillae*** (Fig 2.5av-be) regroupent différents morphes de taille moyenne, jusqu'à 40µm, qui présentent au moins un apex (le cône) et une table (une plaque pouvant être interprétée comme les rebords du cône), formes qu'Ollendorf (1992) nomme Sedge Cone Phytolith. En microscopie optique, les morphotypes de *Papillae* sont également reconnaissables en vue planaire par l'identification d'une « lumière » qui correspond à la position du creux formé par l'apex. La variation dans la forme, la quantité ou encore l'ornementation de ces deux caractères principaux, l'apex et la table, produit une importante diversité de phytolithes *Papillae*. Le tableau 2.3, qui correspond à une adaptation de la nomenclature des *Papillae* d'Ollendorf (1992), en témoigne puisqu'il permet de nommer un minimum de 720 combinaisons morphologiques différentes. Si cette classification paraît très précise dans sa description, elle est en revanche difficile à manier. Pour exemple, la forme UENPGD (Fig 2.5bb-bc) est décrite comme une *Papillae* à apex Unique (U), en forme d'Enclume (E), sans Satellite (N), avec une table Angulaire (P) et Granulaire (G) et dont les contours sont Droits (D). Dans le tableau 5.1 d'Ollendorf (1992), pas moins de 26 de ces noms morphologiques sont énumérés selon cette nomenclature, compliquant de cette manière, leur discrimination au sein du document (*il faut imaginer des colonnes de combinaisons de 5 lettres, parfois multiples en fonction des taxons étudiés, pour une juxtaposition d'une cinquantaine de taxons*). Ainsi, il est difficile d'avoir une nomenclature à la fois simple d'utilisation et aussi précise que possible. Contrairement aux GSSCP, toutes les formes sont donc regroupées au sein du morphotypes ***Papillae*** (ou Cone) et sont seulement classées en sous-morphotypes en fonction des régions étudiées.

Les *Papillae* sont majoritairement formés lors de la silicification des cellules épidermiques du péricarpe des achènes de Cyperaceae (Piperno, 2006). La plupart des études associent donc toujours les morphotypes de *Papillae* aux Cyperaceae (Iriarte et Paz, 2009 ; Novello et al., 2012 ; 2018). Les travaux menés par Ollendorf (1992), puis par Honaine et al. (2009), laissent penser qu'une désignation précise des sous-morphotypes au sein des *Papillae* pourrait permettre d'identifier certains genres au sein des Cyperaceae. Novello et al. (2012) et Garnier (2013) rapportent que les *Papillae* sont généralement peu observés dans les assemblages modernes ou fossiles d'Afrique. Cette même observation a été faite en Asie (Chabot et al., 2018) et en Amérique du Sud (Iriarte et Paz, 2009 ; Watling et al., 2016). Il semble alors que les *Papillae*, malgré leur grande diversité, apportent une information écologique assez réduite dans la lecture des assemblages.

Nombre d'Apex		Forme de l'Apex		Satellite à l'Apex		Forme de la Table		Texture de la Table		Bord de la Table	
U	Unique		Enclume							D	Droit
	Multiple		Allongée								
M	Multiple		Flèche							B	Recourbé
			Conique								

Vert = Apex Bleu = Table Orange = Satellite Violet = Texture

Tableau 2.3 : Description de la diversité des caractères morphologiques propres aux morphotypes de Papillae (Sedge Cone Phytolithes). Pour exemple le morphotype UENPGD correspond aux caractères U = Apex Unique, E = Apex en Enclume, N = pas de satellite à l'Apex, P = une table de forme angulaire, G = une texture Granulaire de la table et D = une table avec des bords droits. (Inspiré de Ollendorf et al., 19920)

L'appellation « cône » pour les *Papillae* peut amener certaines confusions qu'il est utile de présenter dans le cadre de notre classification. Dans un premier temps, les Hat shape (Fig 2.4w-z) déjà présentés au sein des *Globular* comme une variante particulière des morphotypes Echinata, ont parfois été considérés comme une forme conique (Kealhofer et Piperno, 1998 ; Chabot, 2017). Au contraire des *Papillae*, les formes Hat shape possèdent un apex plein qui, en microscopie optique, ne va pas ressortir par contraste de luminosité. Il m'est alors difficile de les classer comme *Papillae*. Le même souci se pose pour certains phytolithes de Commelinaceae (Fig 2.6s-v), qui vont également présenter une forme papillaire, c'est-à-dire composée d'une table et d'un pied. Mais au contraire des *Papillae*, ces formes ont une morphologie fixe : la table, assez épaisse, est toujours recourbée vers le pied, dont les côtés sont concaves et la base aplanie (Eichhorn et al., 2010 ; Garnier, 2013). Au contraire des *Papillae*, le pied est plein, ce qui ne permet pas la présence d'une « lumière » à sa visualisation.

Enfin, certaines formes de phytolithes, de 20 à 30µm, provenant des fruits de Burseraceae, pourraient également être confondues avec les *Papillae* (Piperno, 2006). Ce morphotype papillaire dérive des formes de Cyperaceae par un apex ouvert avec des cils et une table relativement moins aplanie. Malgré des caractères bien identifiés pour ne pas intégrer toutes les formes coniques aux *Papillae*, la variation morphologique importante des phytolithes pourrait créer des formes de transition. Il est important, comme dans le cas des autres morphotypes, de bien connaître la végétation de la zone étudiée pour interpréter certains morphotypes dans les assemblages.

c). Catalogue des phytolithes CAP : *Cavate-Anisopolar-Prism*

Les morphotypes Cavate

Certaines formes de phytolithes présentent une morphologie en « dépression/creux » (trough) que la nouvelle nomenclature désigne comme *Cavate* (Neumann et al., 2019). Deux types principaux de *Cavate* ont été mis en évidence. Un de ces morphotypes, le ***Cavate volcano*** (Fig 2.6a-c), a une forme rectangulaire à oblongue, de 10 à 20µm, avec des bords lisses ou irréguliers et présente un processus central surélevé et légèrement creusé (Chen et Smith, 2013). Le second morphotype, le ***Cavate flat*** (Fig 2.6d-g), est plus grand, jusqu'à 30µm et présente une morphologie plus plane. La dépression centrale donne l'impression de séparer en deux la forme, tandis que les deux parties du morphotype peuvent être ornementées de pointes (Chen et Smith, 2013).

Le morphotype *Cavate volcano* est produit dans et hors des cellules du parenchyme des tissus vasculaires des feuilles de Musaceae ainsi que dans les cellules des graines (Prychid et al., 2003 ; Lentfer, 2009). Chen et Smith (2013) indiquent que ce type de phytolithe n'est présent que chez les Musaceae et plus particulièrement dans le genre *Musa* sp.. Ces phytolithes sont donc un indicateur de la présence/culture de la banane. Les travaux sur les liens entre phylogénie des espèces de bananes et diversité morphologique de ces phytolithes ont montré qu'il est possible d'avoir une assignation taxonomique plus précise au sein du genre *Musa* sp. (Vrydaghs et al.,

2009). Toutefois, des référentiels sur les environnements actuels riches en bananiers montrent que les phytolithes *Cavate volcano* sont faiblement enregistrés dans les sols (Chabot et al., 2018).

Le *Cavate flat* n'a été documenté que dans le parenchyme des tissus vasculaires des feuilles d'Heliconiaceae et plus particulièrement, du genre *Heliconia* sp. (Prychid et al., 2003). Les travaux à l'échelle des Zingibérales ont démontré qu'il est un phytolithe diagnostique du genre (Piperno, 2006 ; Chen et Smith, 2013). Ainsi, dans les assemblages, fossiles ou actuels, ce phytolithe est interprété comme indicateur d'*Heliconia* sp., une plante herbacée dicotylédone (Iriarte et al., 2010 ; Dickau et al., 2012 ; Watling et al., 2016).

Les morphotypes Anisopolar shape

Les phytolithes nommés **Anisopolar** ont une morphologie bien particulière. Comme l'étymologie *anisos* (« non égal » en grec) du nom l'indique, il s'agit d'un morphotype grossièrement cylindrique, en moyenne de 30 à 40µm, composé de deux pôles antagonistes : le pôle supérieur montre une forme prismatique ou du moins polyédrale, qui se termine par un sommet faiblement conique à plat ; le pôle inférieur est plus cylindrique et possède une ornementation granulaire très fine. Ces deux caractères sont assez variés et entraînent une grande diversité de formes (Eichhorn et al., 2010). Le pôle supérieur varie dans la forme de son polyèdre, sa taille, son ornementation et sa terminaison tandis que le pôle inférieur varie lui dans sa taille, son ornementation, de par la présence d'écailles recourbées et la terminaison du cylindre (Eichhorn et al., 2010). Dans la littérature, on distingue au moins trois sous-morphotypes : les **Anisopolar great** (Fig 2.6y-z), des très grandes formes dépassant les 50µm avec une terminaison du pôle supérieur en pointe (Runge, 1999 ; Piperno, 2006), les **Anisopolar standard** (Fig 2.6l-r) qui constituent la majorité des formes, sont inférieurs à 40µm et possèdent une terminaison plus ou moins aplatie (Chandler-Ezell et al., 2006 ; Eichhorn et al., 2010 ; Dickau et al., 2013) et enfin le dernier sous-morphotype, l'**Anisopolar outgrowth** (Fig 2.6w-x) qui présente un pôle polyédral réduit et peu marqué, pour laisser place à un pôle basal plus fin arborant des excroissances organisées en échelle ou alternées (Runge, 1999 ; Watling et al., 2016).

La plupart de ces morphotypes ont initialement été considérés comme produits par les Marantaceae (Runge, 1999 ; Chandler-Ezell et al., 2006 ; Piperno, 2006). Eichhorn et al. (2010) ont montré qu'une majeure partie des formes *Anisopolar standard* sont en réalité, et pour l'Afrique, produites dans les graines de Commelinaceae. En revanche, dans les tropiques américains, Chandler-Ezell et al. (2006) ont bien identifié un morphotype *Anisopolar standard* dans le rhizome des Marantaceae. Concernant l'*Anisopolar outgrowth*, il n'a pour le moment qu'été identifié dans les graines de Marantaceae (Runge, 1999 ; Watling et al., 2016). Ainsi, l'utilisation de ces morphotypes dans les assemblages est liée à la connaissance des écosystèmes de l'étude. Dans les zones tropicales américaines, si les *Anisopolar great* et *Anisopolar outgrowth* indiquent la présence de Marantaceae, les *Anisopolar standard* pourraient à la fois indiquer des Marantaceae et des Commelinaceae. Si Eichhorn et al. (2010) insistent sur le fait que les *Anisopolar standard* de Marantaceae ont une terminaison plus plate du pôle supérieur, il semble

difficile d'appliquer sans hésitation ce caractère en raison de la grande diversité des formes. Ainsi, dans les assemblages des tropiques américains, la présence d'*Anisopolar standard* est à interpréter comme marqueur des plantes herbeuses monocotylédones. Une connaissance plus poussée de la végétation moderne pourrait permettre de trancher quant à l'origine de ces phytolithes.

Flat polygonal prisms with conical top Phytolith

Le dernier morphotype présenté est nommé *Flat polygonal prisms with conical top* et a été proposé par Eichhorn et al. (2010). Comme son nom l'indique, la partie basale de ces morphotypes correspond à un prisme pentagonal à octogonal, de 20 à 30µm, tandis que la partie supérieure peut être considérée comme un pied toujours plus court que la largeur. Dans les travaux d'Eichhorn et al. (2010), on distingue deux morphotypes particuliers. Pour le morphotype ***Prism conical top*** (Fig 2.6s-v), la partie basale a généralement des bords sinueux en vue planaire et recourbés en vue latérale. En vue planaire, le cône est perçu comme une forme circulaire au sein du prisme tandis qu'en vue latérale, la forme a des côtés concaves et une face supérieure plate à légèrement convexe. Ce cône peut aller jusqu'à correspondre à la taille de la partie basale (Eichhorn et al., 2010). L'autre morphotype, ***Prism large top*** (Fig 2.6h-k), possède une partie basale prismatique lisse, de 20 à 30µm. La partie supérieure est, en général, difficilement distinguable et prend la plupart du temps la forme d'un pied très court, avec une large extension donnant une forme de soucoupe au morphotype (Eichhorn et al., 2010).

La plupart de ces phytolithes n'ont été observés que dans les graines de Commelinaceae africaines (Eichhorn et al., 2010). Les phytolithes *Prism* sont donc interprétés comme trace de Commelinaceae dans les assemblages modernes ou fossiles. Toutefois, et notamment pour les formes *Prism conical top*, il est possible de confondre l'identification de ce morphotype avec les morphotypes *Papillae* de Cyperaceae. Mais si les formes se ressemblent beaucoup, la formalisation des caractères (structure du cône, texture, etc.) permet aujourd'hui d'éviter la confusion dans l'interprétation des assemblages.

iii). Les morphotypes à distribution large

a). Les morphotypes *Blocky*

Dans de nombreuses classifications de phytolithes, on retrouve des morphotypes sous les noms de Polyhedral, Blocky polyhedron, Rectangle, Blocky bodies, Bulliform rectangular, Parallepiped, etc. (Tab 2.2 ; Neumann et al., 2019). Tous ces noms font référence au même morphotype de phytolithe, *Blocky*, qui présente une grande forme en pavé, de 40 à 150µm, dont la largeur et l'épaisseur ne peuvent pas être deux fois inférieurs à la longueur. En général, la forme, plus ou moins régulière, possède donc 6 faces qui peuvent être plates à légèrement convexes/concaves dont les arêtes sont bien marquées et anguleuses. Les faces sont, en général, lisses mais peuvent parfois prendre une texture légèrement granulée.

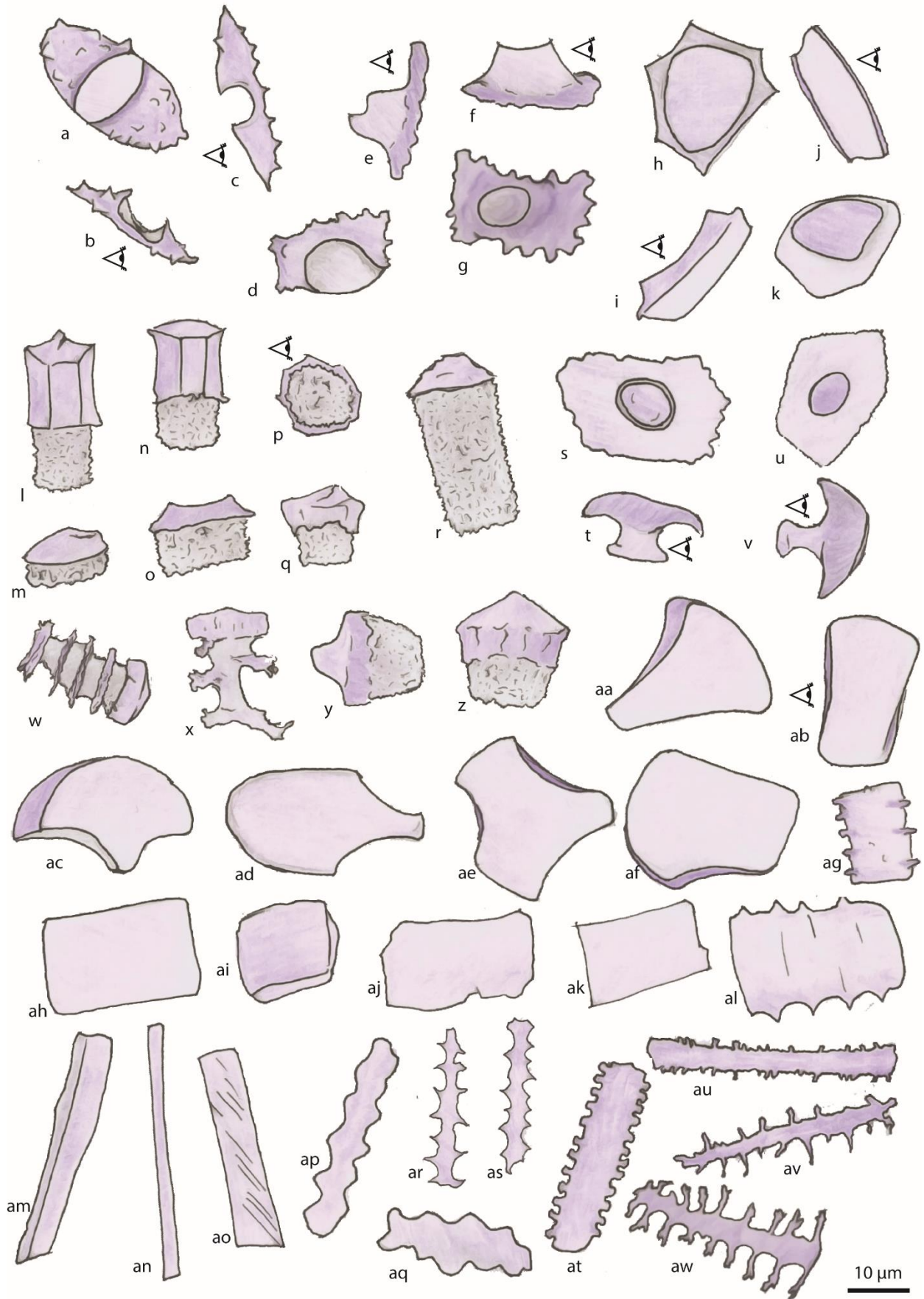


Figure 2.6 : Représentation graphique de différents morphotypes associés aux herbacées, monocotylédones, et à diverses plantes :. a-c Cavate flat; d-g Cavate volcano ; h-k Prism large top ; l-r Anisopolar standart ; s-v Prism cone top ; w-x Anisopolar outgrowth ; y-z Anisopolar great ; aa-af Bulliform flabellate ; ag-al Blocky ; am-aw Elongate. Symbole œil = vue différente d'un morphotype

Au sein de ce morphotype, deux types principaux peuvent être retenus : les ***Blocky psilate*** (Fig 2.6ah-ak) présentent donc un aspect lisse tandis que les ***Blocky decorate*** (Fig 2.6ag, al) vont présenter des projections ou protubérances qui peuvent prendre la forme d'épines, de dents ou de sinuosités.

Ces phytolithes ont été décrits dans de nombreux taxons qui traversent l'arbre phylogénétique des angiospermes et gymnospermes (Fig 2.3). Ainsi, ces formes ont rapidement été identifiées dans des tissus de plantes monocotylédones herbacées (Mulholland et Rapp, 1992) et de plantes dicotylédones herbeuses ou arbustives (Piperno, 1988 ; Bozarth, 1992). Des travaux plus récents ont validé ces premières observations (Blinnikov, 2005 ; Piperno, 2006 ; Collura et Neumann, 2017) et ont également décrit la présence de ces morphotypes chez des familles de Gymnospermes (Strömberg, 2004). Au vu de cette distribution taxonomique très large, la capacité diagnostique de ce morphotype est très limitée.

Toutefois, il a été montré que certaines formes épineuses étaient massivement produites par des espèces de bambou (Testé et al., 2020). Une maîtrise de la végétation étudiée et du lien entre morphotypes et espèces, à un niveau local, pourrait donc améliorer la qualité bioindicateur de certaines formes particulières des morphotypes *Blocky*.

Les phytolithes *Blocky* possèdent une morphologie formalisée, ce qui les distingue des phytolithes de type TSLP, ces derniers étant surtout désignés par leur irrégularité. Toutefois, dans le cadre d'une ornementation facettée ou « pitted » de *Blocky*, ces formes pourraient être respectivement rapprochées des morphotypes Irregular faceted et Irregular pitted des TSLP. Dans le cadre d'une érosion importante certaines formes peuvent également être confondues avec des TSLP. Par ailleurs, Neumann et al. (2019) soulignent que les formes générales de *Blocky* n'ont pas encore été trouvées chez les Poaceae.

b). Les phytolithes « *Bulliform* » *fan-shape* ou *flabellate*

L'utilisation du terme « bulliform » dans le nom du morphotype présenté, ***Bulliform flabellate*** (Fig 2.6aa-af ; Neumann et al., 2019), fait référence à de grandes cellules (entre 20 et 200µm), les cellules bulliformes, qui répondent aux variations hydriques chez la plante. Ces cellules se situent principalement dans l'épiderme des feuilles de monocotylédones, principalement des Poaceae (Sangster et Parry, 1969 ; Meyer et al., 2008). Ainsi, les phytolithes *Bulliform flabellate* font référence aux silicifications intracellulaires de ces cellules qui vont constituer un phytolithe en forme d'éventail (*flabellum* en latin). En vue planaire, cette forme d'éventail est caractérisée par une partie basale resserrée/étroite en forme de « tige » et une partie supérieure, plus large, dont l'arête principale est le plus souvent en forme d'arc de cercle convexe. Il peut cependant arriver que certaines formes aient le sommet de l'arête supérieure aplanie ou concave (Piperno, 2006 ; Neumann et al., 2019). Vu de côté, le phytolithe épais peut prendre la forme d'un morphotype *Blocky*, d'où la nécessité d'observer la forme en trois dimensions en microscopie optique. On considère que la morphologie générale de ces morphotypes est le plus souvent symétrique sur leur axe vertical et que leur texture est lisse (Neumann et al., 2019). Garnier

(2012) précise toutefois que certains morphotypes de *Bulliform flabellate* peuvent être asymétriques tandis que certaines formes vont présenter des petites facettes sur la partie supérieure (Piperno, 2006 ; Garnier, 2013).

Les premières formes décrites de *Bulliform flabellate*, par Pearsall et Dinan (2002), le sont dans des feuilles de Bambusoideae. Depuis, ces phytolithes ont été identifiés dans un grand nombre de sous-familles de Poaceae mais également de Cyperaceae (Piperno, 2006 ; Neumann et al., 2019). Si certains travaux appellent « Bulliform » tous les phytolithes provenant des cellules éponymes étudiées (Madella et al., 2005), dans les assemblages, seules les formes en éventail peuvent être interprétées avec certitude comme provenant de ces types cellulaires. Les morphes parallélépipédiques de cellules bulliformes sont hélas indissociables des morphotypes *Blocky* et n'y sont donc pas classés. Ainsi, si les *Bulliform flabellate* n'ont pas une résolution taxonomique précise au sein des monocotylédones, il est possible de considérer que ces phytolithes sont des indicateurs écologiques des herbes monocotylédones.

Pour aller plus loin, le fait que ces phytolithes soient associés à des morphologies cellulaires sensibles à la dessiccation a amené certains chercheurs à réfléchir sur la capacité des *Bulliform flabellate* à indiquer les variations hydriques. Pour exemple, Sangster et Parry (1969) indiquent qu'une importante silicification des cellules bulliformes est liée à une grande disponibilité en eau dans la plante tandis que d'autres travaux indiquent plutôt une augmentation des phytolithes dans le cadre d'un stress hydrique ou d'une plus forte évapotranspiration (Bremond et al., 2005b ; Neumann et al., 2019). D'ailleurs, Bremond et al. (2005b) utilisent les morphotypes de *Bulliform flabellate* pour calculer un indice signant les variations de stress hydrique.

Enfin, Garnier (2013) souligne que certaines formes particulières et asymétriques ne sont retrouvées que chez certains genres de Bambusoideae. D'autres travaux ont montré que les phytolithes *Bulliform flabellate* peuvent faire l'objet d'études morphométrique et morphologique pour distinguer le riz domestique (Pearsall et al., 1995 ; Huan et al., 2015) du riz sauvage (Yost et Blinnikov, 2011) ou des herbes sauvages.

c). Les phytolithes *Elongate*

Comme le nom du phytolithe, *Elongate*, l'indique, il s'agit de morphologies très allongées, de 20 à 700µm, qui sont en général rectilignes et où la longueur est au minimum 2 fois supérieure à la largeur (ce qui les distingue des formes *Blocky*). Les terminaisons de la forme sont, elles, plus diverses avec des formes plates, concaves, convexes ou encore en biseau. Du fait de cette taille effilée, la forme apparaît donc très souvent comme un rectangle en deux dimensions sous microscope optique. Toutefois, une vue transversale de ces formes montre des sections angulaires à oblongues, démontrant bien une forme en trois dimensions (Madella et al., 2005 ; Neumann et al., 2019). La texture des morphotypes *Elongate* est, en général, lisse mais peut éventuellement être granuleuse ou striée (Runge, 1999 ; Collura et Neumann, 2017). L'ornementation des morphotypes peut en revanche être très diverse. Ainsi, les bords longs peuvent être assez

sinueux, avec une sinuosité plus ou moins régulière à crénelée (Runge, 1999). Ils peuvent également présenter des bords épineux ou dendritiques (Hodson et Sangster, 1988 ; Novello et Barboni, 2015). Il est possible de discriminer au moins deux morphotypes principaux chez les *Elongate*, qui sont les *Elongate psilate* (Fig 2.6am-an) et les *Elongate decorate* (Fig 2.6ap -au).

Initialement, les *Elongate psilate* étaient identifiés dans les chaumes de Poaceae (Twiss et al., 1969) mais ont depuis été décrits dans différents tissus végétaux (épiderme, parenchyme, sclérenchyme) de nombreux taxons, des Pinophytes aux Dicotylédones en passant par les Monocotylédones (Strömberg, 2004). Les formes *Elongate psilate* sont donc réparties dans la plupart des taxons de plantes terrestres et leur apport taxonomique est assez faible. Neumann et al. 2019 proposent donc de définir des sous-types en fonction de la section des morphotypes dans l'attente d'une exploration anatomique plus résolue. Runge (1999) et Collura et Neumann (2017) considèrent tout de même que les *Elongate psilate* avec une striation fine et diagonale sont caractéristiques des dicotylédones ligneuses.

Chez les *Elongate decorate*, l'assignation taxonomique est plus discutée. Les formes avec des bords sinueux ont été identifiées initialement chez les Poaceae (Twiss et al., 1969 ; Gallego et Distel, 2004) et par la suite, chez les Cyperaceae (Honaine et al., 2009) ou encore chez les Fougères et les Conifères (Strömberg, 2004). Pour les formes avec des bords à épines, leur répartition semble beaucoup plus localisée aux Poaceae (Twiss et al., 1969 ; Lu et Liu, 2003 ; Gallego et Distel, 2004). Même si Neumann et al. (2019) décrivent le morphotype chez les Marantaceae, celui-ci pourrait également donner une information écologique sur la présence d'herbes monocotylédones. Enfin, les morphotypes avec des processus dendritiques sont produits de manière importante dans les inflorescences de Poaceae (Strömberg, 2004 ; Novello et Barboni, 2015) mais sont également indiqués dans différentes familles de monocotylédones et de dicotylédones (Neumann et al., 2019). Il est à noter que certains travaux exploratoires commencent à s'intéresser à la morphologie et la morphométrie de ces phytolithes, pour identifier des céréales cultivées (Zhang et al., 2013 ; Ball et al., 2017). Il semble alors que certains *Elongate decorate* pourraient nous apporter une information écologique, notamment les formes à pointes, mais ce groupe de phytolithes reste tout de même peu informatif d'un point de vue taxonomique et écologique.

Si la forme *Elongate* est bien différenciée des morphotypes *Blocky* par les rapports de taille, il est possible de les confondre avec d'autres bioindicateurs. En effet, certains spicules d'éponges présentent des formes allongées et rectilignes, lisses ou avec des processus épineux. L'identification d'un canal central allongé sur toute la forme permettra d'identifier sans hésitation les spicules d'éponges et de ne pas les confondre avec les morphotypes d'*Elongate*.

iv). Conclusion sur la représentativité taxonomique et écologique

De ces descriptions, la formation des phytolithes ne répond pas, uniquement, à un patron phylogénétique (Fig 2.3 ; Tab 2.1). En effet, la majorité des ordres relevés présentent à la fois des

familles produisant massivement des phytolithes et des familles n'en produisant pas du tout. Il est à noter que sur les 63 familles de dicotylédones répertoriées par Piperno (2006 ; Fig 2.3), seul un tiers d'entre elles produisent des phytolithes. Pour les monocotylédones, ce ratio atteint une famille sur deux, pour 32 familles étudiées.

La séparation entre monocotylédones et dicotylédones s'exprime également par le nombre de types de morphotypes diagnostiques de familles. Chez les dicotylédones, seuls les Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000) et les Podostemaceae (Piperno, 2006 – *non traités dans notre classification*) produisent des phytolithes distinctifs et diagnostiques. L'ensemble des autres familles produisant des phytolithes diagnostiques des dicotylédones est rassemblé seulement sous deux principaux groupes de morphotypes : les *Globular* et les TSLP (Tab 2.1), soit 8 morphotypes, et ils le sont uniquement pour les arbres dicotylédones. Cette pauvreté taxonomique est d'ailleurs impactée par la redondance des mêmes types de phytolithes, principalement des TSLP, chez les arbres Magnoliaceae et Annonaceae. Chez les monocotylédones, on compte au moins 25 morphotypes diagnostiques (Fig 2.3 ; Tab 2.1) répartis sur 11 familles, que sont les Arecaceae, les Bromeliaceae, les Cannaceae, les Commelinaceae, les Costaceae, les Cyperaceae, les Heliconiaceae, les Marantaceae, les Musaceae, les Poaceae et les Zingiberaceae. Ces 11 familles forment un réservoir équivalent au tiers des espèces estimées de monocotylédones (1 autre tiers étant occupé par les Orchidaceae).

Cette classification témoigne de la large représentation taxonomique des monocotylédones par les phytolithes. Les dicotylédones et les angiospermes basales sont plutôt mal représentées taxonomiquement par les phytolithes. D'un point de vue écologique, la conclusion est identique avec des phytolithes qui indiquent la présence d'arbre ou de dicotylédones ligneuses sans plus d'information écologique. A l'inverse, les phytolithes, qui indiquent les plantes herbacées ou arborées-non-ligneuses, sont très diversifiés et permettent d'approcher certaines conditions écologiques.

II. Construction d'un référentiel phytolithique

1. Application des phytolithes aux recherches archéologiques

i). Utilisation des phytolithes en Amérique

A mesure que les recherches sur le potentiel taxonomique des phytolithes avançaient, ces derniers ont été utilisés comme outils paléoenvironnementaux. Les premiers travaux archéologiques ont été réalisés en Europe au début des années 1900, tout particulièrement par l'école botanique allemande (Pearsall, 1982). Piperno (2006) indique que les travaux des années 60 sur les phytolithes d'herbacées et les classifications associées (Parry et Smithson, 1964 ; Blackman, 1969 ; Twiss et al., 1969 ; Rovner, 1971) ont favorisé l'utilisation de ce nouveau bioindicateur sur le continent américain. Ces dates correspondent, en effet, à l'application d'analyses de phytolithes pour l'étude des civilisations américaines (Matsutani, 1972), rapidement suivie par des travaux archéologiques de plus en plus nombreux (Rovner, 1975 ; Lewis, 1978 ; Pearsall, 1978).

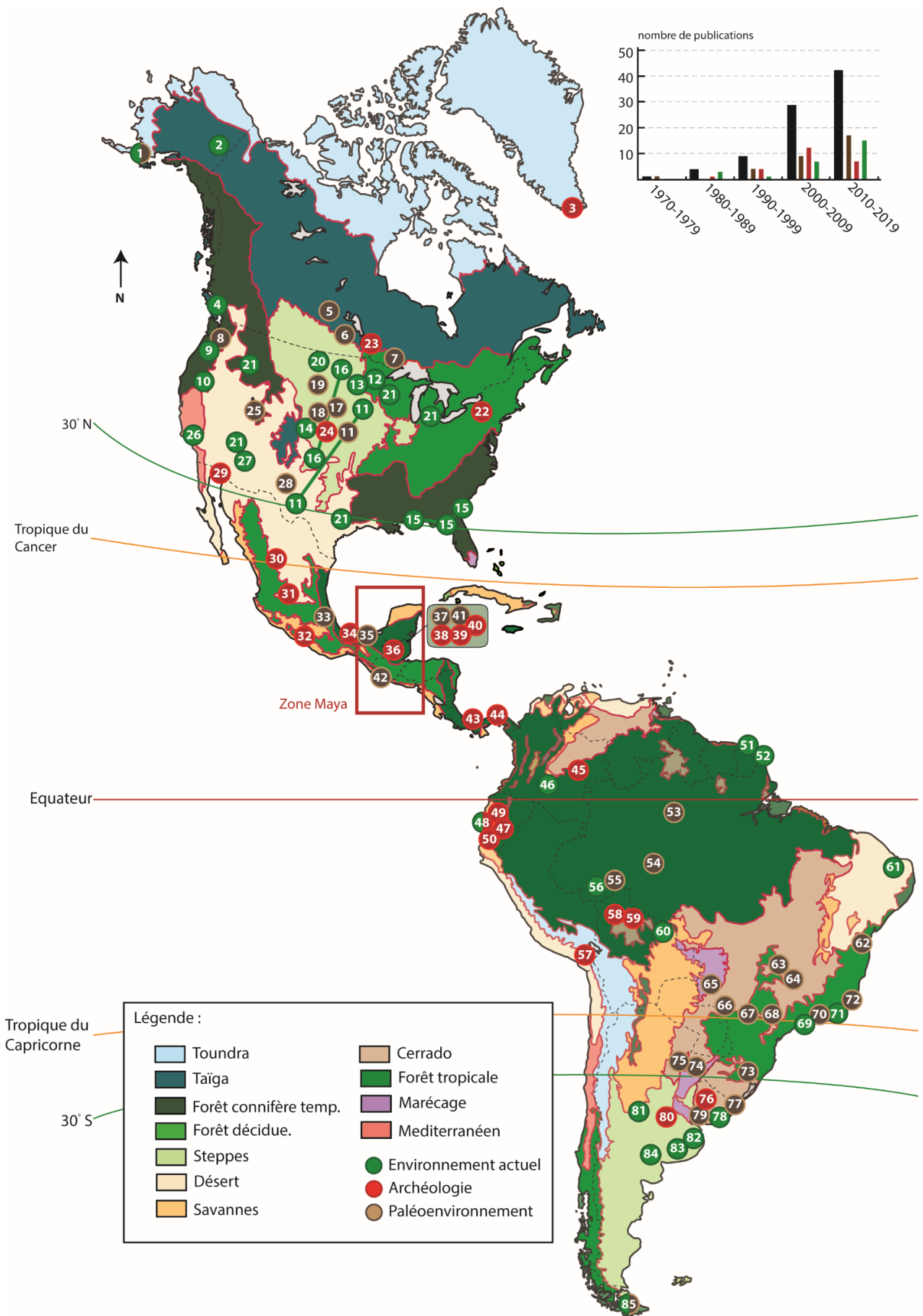


Figure 2.7 : Localisation géographique des principales études sur les phytolithes sur le continent américain (au moins un diagramme/tableau de résultats et/ou une figuration des morphotype) corroboré en fonction des biomes végétaux. (1. Wilbur, 2013 ; 2. Wooler et al., 2011 ; 3. Ross, 2004 ; 4. McCune et Pellatt, 2013 ; 5. Cyr et al., 2011 ; 6. Boyd, 2005 ; 7. Boyd et al., 2013 ; 8. Blinnikov et al., 2002 ; 9. Blinnikov, 2005 ; 10. Kirchholtes et al., 2015 ; 11. Cordova et al., 2011 ; 12. Yost et Blinnikov, 2011 ; 13 Yost et al., 2013 ; 14. Kurman, 1985 ; 15. Lu et Liu, 2003 ; 16. Fredlund et Tieszen, 1994 ; 17. Stromberg, 2004 ; 18. Strombert et McInerney, 2011 ; 19. Fredlund et Tieszen, 1997 ; 20. Mulholland, 1989 ; 21. Hyland et al., 2013 ; 22. Thompson et al., 2004 ; 23. Boyd et Surette, 2010 ; 24. Bozarth, 1998 ; 25. Lewis, 1978 ; 26. Bartolome et al., 1986 ; 27. Kerns, 2001 ; 28. Fredlund et al., 1998 ; 29. Reinhard et Danielson, 2005 ; 30. Elliott et al., 2010 ; 31. Trombold et Israde-Alcantara, 2005 ; 32. Piperno et al., 2009 ; 33. Tovar et al., 2014 ; 34. Pohl et al., 2007 ; 35. Solis-Castillo et al., 2015 ; 36. Bozarth et Hansen, 2001 ; 37. Beach et al., 2009 ; 38. Bozarth et Guderjan, 2004 ; 39. Cummings et Magennis, 1997 ; 40. Abramiuk et al., 2011 ; 41. Krause et al., 2019 ; 42. Neff et al., 2006 ; 43. Piperno, 1985 ; 44. Piperno, 1994 ; 45. Morcote-Rios et al., 2013 ; 46. Morcote-Rios et al., 2016 ; 47. Pearsall et al., 2004 ; 48. Ezell et al., 2006 ; 49. Piperno et Stothert, 2003 ; 50. Pearsall et Piperno, 1990 ; 51. Iriarte et al., 2010 ; 52. Watling et Iriarte, 2013 ; 53. Piperno et Becker, 1996 ; 54. McMichael et al., 2015 ; 55. Watling et al., 2015 ; 56. Watling et al., 2016 ; 57. Perry et al., 2006 ; 58. Whitney et al., 2014 ; 59. Dickau et al., 2012 ; 60. Dickau et al., 2013 ; 61. Ricardo et al., 2018 ; 62. Lorente et al., 2015 ; 63. Borba-Roschel, 2006 ; 64. Augustin et al., 2014 ; 65. Rasbold et al., 2019 ; 66. Ramirez et al., 2019 ; 67. Calegari et al., 2013 ; 68. Alexandre et al. 1999 ; 69. Coe et al., 2017 ; 70. Coe et al., 2013 ; 71. Coe et al., 2014 ; 72. Silva Neto et al., 2018 ; 73. Calegari et al., 2017 ; 74. Erra et al., 2013 ; 75. Zucol et al., 2005 ; 76. Menendez et al., 2009 ; 77. Iriarte, 2006 ; 78. Iriarte et Paz, 2009 ; 79. del Puerto et al., 2006 ; 80. Bonomo et al., 2011 ; 81. Babot et al., 2017 ; 82. Honaine et al., 2009 ; 83. Honaine et al., 2006 ; 84. Gallego et Distel, 2004 ; 85. Benvenuto et al., 2013

P

Pour Piperno (2006), les années 80 marquent la démocratisation des phytolithes comme bioindicateurs paléobotaniques dans les contextes archéologiques (Rovner, 1988 ; Piperno et al., 1990 ; Piperno, 1991).

Sur un panel de 85 publications concernant des travaux phytolithiques réalisés sur le continent américain (Fig 2.7), plus de 80% d'entre elles ont été publiées à partir des années 90. La localisation géographique de ces publications permet de dresser une ébauche d'interprétation quant aux dynamiques de l'utilisation des phytolithes dans les Amériques.

La première observation est que 85% des études concernant la végétation actuelle sont localisées dans des zones de savanes et de prairies ou sur des zones littorales assez ouvertes (Fig 2.7). Cette surreprésentation des milieux ouverts est en accord avec les remarques de Piperno (2006). La mauvaise réputation des phytolithes, de n'être que de bons indicateurs taxonomiques chez les herbacées, aurait plutôt favorisée l'étude des grandes formations végétales ouvertes. Cette même répartition des travaux phytolithiques se retrouve également sur le continent africain, où la majorité des études contemporaines sont localisées dans des zones de savanes (Garnier, 2013).

La seconde observation est que les études archéologiques et paléoenvironnementales sont pour la plupart déconnectées des études contemporaines sur les environnements et/ou les plantes locales. En effet, sur les soixante travaux étudiant les phytolithes en contexte archéologique ou sur des environnements précis, seuls quatre ont une étude préliminaire des phytolithes modernes de plantes ou de sols (Wilbur, 2013 ; Ezell et al., 2006 ; Cordova et al., 2011 ; Benvenuto et al., 2013).

La carte de la Figure 2.7 ne présente pas les nombreuses publications qui étudient les phytolithes produits par des plantes prélevées sur l'ensemble du continent (Piperno et Pearsall, 1998 ; Cummings, 1992 ; Piperno, 2009 ; Chen et Smith, 2013). Pour interpréter des assemblages fossiles, il est possible de passer par une approche spécifique qui repose sur le fait qu'un phytolithe produit par une plante, en est un indicateur taxonomique. Ce type de publication, avec des catalogues de plantes, permet alors de mener des études fossiles sans avoir à mener de travaux actualistes.

ii). Les travaux phytolithiques en zone maya

Les études phytolithiques de la zone maya n'échappent pas à ces observations. Dominée en grande partie par une zone de forêt tropicale qui recouvre de nombreux sites archéologiques, les travaux sur le Petén s'intéressent principalement à des sondages et artefacts archéologiques intrasites ou des sondages pédologiques hors-site (Fig 2.7). Les travaux de Neff et al. (2006) et de Solís-Castillo et al. (2015) portent respectivement sur les littoraux pacifiques et sur le golfe du Mexique ainsi que sur les civilisations mésoaméricaines associées. Les autres études sont, en revanche, plus orientées vers la forêt du Petén et les mayas au Guatemala (Bozarth et Hansen, 2001) et au Belize (Cummings et Magennis, 1997 ; Bozarth et Guderjan, 2004 ; Beach et al., 2009 ; Abramiuk et al., 2011 ; Krause et al., 2019).

Le premier travail sur les phytolithes enregistré en zone maya, au Belize, a étudié le contenu du tartre dentaire de 24 adultes (Cummings et Magennis, 1997). Le but de cette étude était d'observer les variations de régimes alimentaires entre adultes de différentes périodes mayas. Si l'étude montre la présence de phytolithes, c'est surtout sur la base des fibres et des grains d'amidon que les régimes alimentaires sont abordés. La découverte de phytolithes d'Arecaceae, sur certaines dents, indique que les noix de palmiers faisaient partie du régime alimentaire. En revanche, le maïs ou encore le manioc sont principalement identifiés avec l'amidon. Cette étude partielle des phytolithes montre leur complémentarité avec d'autres bioindicateurs pour les questions de reconstitution des régimes alimentaires sur la base du tartre.

L'étude menée par Bozarth, sur le site de Nakbe (Bozarth et Hansen, 2001), avait pour but de montrer que les phytolithes pouvaient, de par leur concentration et leur diversité, être utilisés comme indicateurs de la végétation, notamment des plantes cultivées. Dans cette étude, Bozarth décrit ce qu'il considère comme le premier phytolithe de maïs, identifié en zone maya, mais également des phytolithes de courge. Si les assemblages atteignent bien les 300 morphotypes, pour chacun des trois échantillons, les différents morphotypes ne sont pas présentés et une interprétation des assemblages n'est donc pas possible. Cependant, Bozarth en conclut que les phytolithes sont des bioindicateurs idéaux pour reconstituer la végétation passée.

En 2004, Bozarth et Guderjan étudient le contenu biosilicaté de vases attribués aux Mayas. L'étude de ces restes a permis d'identifier la présence de phytolithes de dicotylédones, attribuée

à des fruits et des feuilles ainsi que celle des phytolithes de Cucurbitaceae et d'Heliconiaceae. La plupart des résidus de vases étaient également très riches en spicules d'éponges, sans toutefois en interpréter la provenance. Cette étude a renforcé l'idée d'une utilisation des phytolithes comme bioindicateurs de cultivars, initiée par Bozarth et Hansen en 2001.

Le travail multiproxy, mené par Beach et al. (2009) sur les zones humides proches de sites archéologiques brésiliens, utilise les phytolithes pour des reconstitutions de végétation. Sur une séquence paléoenvironnementale, dans un champ surélevé, les auteurs étudient les variations temporelles des richesses relatives en phytolithes de Marantaceae, d'Asteraceae et de Poaceae. L'étude de ces trois seuls taxons et de leurs morphotypes associés a pour but, dans cette étude, de compléter de nombreuses autres données, géomorphologiques, géochimiques et paléontologiques. Les auteurs ne cherchent pas particulièrement à promouvoir l'utilisation des phytolithes mais les considèrent comme un bioindicateur à part entière, malgré une étude partielle des morphotypes.

L'étude d'Abramiuk et al. (2011) a également pour but d'utiliser les phytolithes afin d'obtenir des informations concernant les plantes cultivées chez les Mayas et d'en tirer des conclusions paléoethnobotaniques, à partir d'échantillons de sols anciens au Belize. 4 échantillons d'un sondage archéologique ont fourni des assemblages de phytolithes qui sont étudiés de manière globale, l'ensemble des morphotypes étudiés étant représenté dans un diagramme. Les auteurs se servent de la diversité des morphotypes pour attester de cultures multiples et parallèles, et ainsi, aller en faveur d'une agriculture fonctionnant avec une gamme variée de plantes. Toutefois, en l'état de nos connaissances et sur la seule base des morphotypes de phytolithes retenus dans l'étude, il semble difficile de valider la présence d'un genre ou d'une espèce donnée, contrairement à ce qu'affirment les auteurs.

Récemment, Krause et al. (2019) ont mené une étude géomorphologique et paléoécologique sur les sols de zones humide du Belize. 5 échantillons de phytolithes ont été étudiés sur un sondage pédologique réalisé dans un ancien champ d'une zone humide. Contrairement aux travaux de Beach et al. (2009), les morphotypes de phytolithes y sont plus nombreux et y sont traités comme des assemblages de morphes. Toutefois, ce travail est, une nouvelle fois, une approche exploratoire des phytolithes qui permet de compléter des données palynologiques ou géochimiques.

iii). Les phytolithes sont-ils un bioindicateur fiable pour la zone maya ?

Dans les travaux décrits ci-dessus, rien ne laisse penser que les phytolithes ne peuvent pas être utilisés en zone maya. Bozarth et Hansen (2001) parlent d'une bonne conservation et d'une large diversité dans des sédiments riches. Certains cultivars notables de la zone maya, comme le maïs ou la courge, sont identifiés à partir des phytolithes (Cummings et Mangennis, 1997 ; Bozarth et Hansen, 2001 ; Bozarth et Guderjan, 2004). Les zones étudiées vont d'anciens champs en zone naturelle aux artefacts archéologiques en passant par des sondages intrasites (Bozarth et

Guderjan, 2004 ; Abramiuk et al. 2011 ; Krause et al., 2019). Sur cette base-là, nous pouvons pressentir le potentiel des phytolithes à être des bioindicateurs pour la zone Maya.

Toutefois, ces travaux se sont intéressés aux milieux de sédimentation de zones humides avec des végétations relativement ouvertes ou à des contextes archéologiques étudiant des artefacts et à des sondages archéologiques supposés cultivés. Or, les écosystèmes majoritaires de la région, pour les temps actuels, sont des écosystèmes forestiers, qu'ils soient sur les escarpements où dans les zones de *bajo* (Schultze et Whitacre, 1999 ; Martinez et Galindo-Leal, 2002). Piperno (2006) souligne que ce sont principalement les monocotylédones herbacées qui ont été relevées comme productrices de phytolithes diagnostiques mais relativement peu les dicotylédones ligneuses et les arbres. Ainsi, les zones forestières ont été nettement moins étudiées que les zones de prairies ou de savanes (Fig 2.7).

Pourtant, des travaux récents, menés sur la forêt amazonienne au Brésil et en Bolivie, montrent que les phytolithes peuvent discriminer des environnements forestiers tropicaux. En 2013, Dickau et al. étudient des assemblages de sols de surface de 10 écosystèmes boliviens différents, allant de la forêt tropicale haute à des savanes humides ou sèches, en passant par des forêts de palmiers ou de lianes. Ces travaux ont mis en évidence que les assemblages de sols permettaient de caractériser les écosystèmes et de les discriminer, là où le pollen s'avère parfois inutile. Dickau et al. y voient la possibilité de mener des études archéologiques en dehors des zones de dépôts préférentiels de pollens en zone tropicale, c'est-à-dire les lacs et lagunes pérennes.

En 2016, Watling et al. ont mené une étude, complémentaire à celle de Dickau et al. (2013) à la frontière brésilienne avec la Bolivie. 5 écosystèmes ont été testés, allant des zones de forêts tropicales à des zones d'inondation, en passant par des forêts de bambous et de palmiers. Comme pour Dickau et al. (2013), les assemblages de phytolithes ont permis de discriminer chacun des grands types d'écosystème. Ces résultats corroborent ceux observés en Bolivie et permettent de conclure une nouvelle fois que les phytolithes peuvent être de très bons indicateurs de ces communautés végétales.

Les phytolithes semblent donc constituer un bioindicateur cohérent pour la résolution de problématiques paléoécologiques et archéologiques dans les zones tropicales de forêts. La lecture des assemblages permet la discrimination précise d'écosystèmes, pourtant très proches d'un point de vue des formations végétales, et ce malgré un manque de précision taxonomique. Enfin, les nombreux morphotypes distinctifs de cultivars permettent d'aborder les questions d'interaction sociétés-environnements.

L'utilisation des phytolithes dans les zones de forêts denses du Petén soulève les mêmes questions qui ont été posées avec les phytolithes en forêts amazoniennes. Les environnements y sont dominés par des dicotylédones ligneuses, avec des sous-bois pauvres en herbacées. Il sera nécessaire d'évaluer le niveau de discrimination entre les différents écosystèmes à l'aide des phytolithes. De plus, dans un contexte archéologique où les sociétés mayas ont généralement

impacté les environnements forestiers par leurs pratiques, les phytolithes semblent pouvoir jouer un rôle dans l'identification des grandes variations écosystémiques passées.

2. Biais de lecture des assemblages fossiles de phytolithes : éléments de Taphonomie

Dans l'application d'une composante paléontologique à l'étude d'un bioindicateur, il est fondamental de savoir si l'assemblage fossile est le reflet fidèle d'anciennes communautés, c'est-à-dire savoir si le milieu de dépôt est semblable au milieu de vie. En d'autres termes, cela revient à étudier l'origine et les modes de dépôts, ainsi que les perturbations qui contiennent les restes siliceux. Cette partie de l'évaluation du potentiel paléoécologique d'un bioindicateur s'appelle la Taphonomie et elle consiste à énoncer les « lois », c'est-à-dire les facteurs qui régissent l'enregistrement d'une biocénose vers une taphocénose. Chez les phytolithes, au moins 3 facteurs doivent être reconnus avant d'interpréter un assemblage fossile.

i). Durée d'enfouissement et formation d'une taphocénose

Le dépôt des phytolithes est un processus continu, du fait de l'abandon journalier de tissus végétaux, voire par la mort de certaines plantes annuelles, ou celle plus rare, de plantes persistantes. L'incorporation des phytolithes dépend donc des communautés végétales, de la concentration des producteurs en phytolithes, de l'activité biologique du sol, de sa chimie, etc. Ce sont ces facteurs qui vont jouer un rôle dans l'incorporation continue des phytolithes dans les sols de surface (Fig 2.8). Ces dépôts s'accumulent sur un temps long et, en lien avec les processus de pédogénèse, sur un niveau de sol peu épais. Ce phénomène de durée d'enfouissement moyen fait qu'il est difficile d'estimer l'âge, ou plutôt le temps, d'un enregistrement de phytolithes. Un assemblage dans un sol donné peut très bien représenter plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années d'enregistrement (Fredlund et Tieszen, 1994 ; Albert et al., 2006). Ainsi, dans le cadre d'un changement de végétation rapide, n'entraînant pas un scellage du sol moderne, le réservoir initial de phytolithes va être perturbé par ce nouvel enregistrement de phytolithes. Il faut donc lire un assemblage fossile de phytolithes comme le résultat moyenné d'une accumulation continue de phytolithes au cours d'un « temps moyen » de dépôts.

Ainsi, dans le cas d'une étude actualiste ayant pour but de créer des analogues aux assemblages fossiles, il est nécessaire de réaliser des prélèvements qui reproduisent et conservent le même mode d'enregistrement sur un « temps long ». Le prélèvement d'un sol de surface, pour une étude moderne, valide ces paramètres puisqu'il représente un dépôt continu de phytolithes avec un « temps moyen » inconnu. Pour exemple, il arrive souvent que les sols modernes de champs cultivés, depuis seulement quelques années, présentent des assemblages cohérents avec la végétation pré-culture (Chabot, 2017), indiquant bien un décalage entre la biocénose et le dépôt des phytolithes qui forment plutôt une taphocénose.

La différenciation est difficile à faire entre ces deux états. Alors que la biocénose représente les communautés vivantes sur un espace pour un temps donné, la taphocénose représente plutôt les témoins conservés de cette communauté après sa mort et sa conservation sous forme de thanatocénose. Le « temps moyen » d'enregistrement des phytolithes crée un décalage dans la lecture des assemblages. Ainsi, un assemblage A1, présent à un temps T1, hérite en réalité d'une biocénose ayant été présente au temps T0. A l'inverse, A1 sera certainement représentatif de sa communauté contemporaine à un temps T2. Il serait nécessaire ici de développer un nouveau terme qui désignerait les processus de dépôt et de conservation des productions végétales, comme le pollen et les phytolithes.

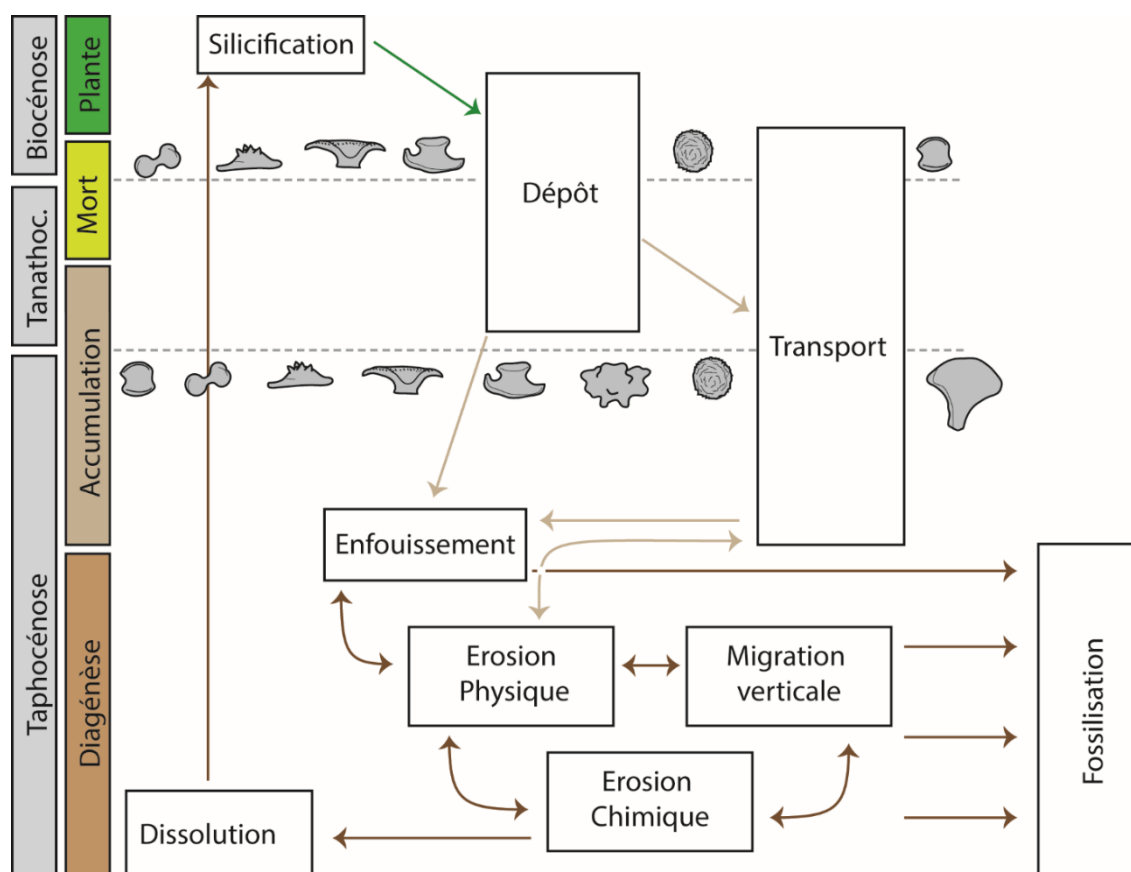


Figure 2.8 – Diagramme récapitulatif des processus menant à la fossilisation des phytolithes en fonction des cycles biologiques et géologiques (modifié d'après Osterrieth et al., 2009)

ii). Perturbation des processus de dépôt

Par leur nature minérale et un mode de dispersion hérité d'un dépôt gravitaire de matière végétale, on considère que les phytolithes sont représentatifs d'une échelle locale, soit à quelques dizaines de mètres (Fredlund et Tieszen, 1994 ; Piperno, 2006). Ils sont également résistants dans les sédiments continentaux, comme en témoigne leur représentation dans les archives mésozoïques (Prasad et al., 2011 ; Wu et al., 2018) ou cénozoïques (Jones, 1964 ; Strömberg, 2005).

Pourtant, certains facteurs peuvent venir perturber ces dépôts (Fig 2.8), en premier lieu le vent. Comme nous l'avons vu en introduction, Darwin (1839) écrit avoir obtenu des phytolithes dans les poussières éoliennes récoltées sur le pont du navire, soit à plusieurs centaines de mètres des côtes. Les travaux menés sur des forages océaniques ont également mis en avant la présence de phytolithes dans les dépôts marins (Folger et al., 1967 ; Parmenter et Folger, 1974 ; Romero et al., 1999). Toutefois, les particules de phytolithes sont relativement plus lourdes que les grains de pollens et ne sont pas sélectionnées pour un transport naturel par vent. Ainsi, c'est essentiellement le degré d'ouverture du milieu qui va favoriser le transport de ces particules de silice (Piperno, 2006). De plus, Alexandre et al., (1997a) indiquent que la canopée des hautes forêts tropicales limite le transport éolien des phytolithes. Nous pouvons donc considérer, aux vues des paysages très découpés géologiquement du Petén et de leurs occupations par les grandes forêts, que le vent n'y est pas un facteur important de déplacement des phytolithes et donc de mélange des assemblages.

En revanche, du fait de leur petite taille (< 250µm) et de leur densité comparable aux particules minérales, les phytolithes sont plus sensibles au transport par l'eau. Certains travaux ont montré que le ruissellement pouvait jouer un rôle dans le transport des phytolithes (Cary et al., 2005 ; Garnier et al., 2013). Toutefois, si Neumann et al. (2009) considèrent que le transport des phytolithes par l'eau est bien présent, ils indiquent qu'il dépend essentiellement des conditions environnementales et qu'il est estimable par l'état d'érosion des phytolithes. En milieu de forêt tropicale, Watling et al. (2016) s'étonnent d'avoir des discriminations si nettes entre les différentes forêts inondées dans le même bassin. Ils en tirent la conclusion que s'il y a transport de phytolithes pendant les phases d'inondation, celui-ci n'affecte pas les assemblages locaux des sols modernes. Dans nos zones étudiées du Petén, l'alternance entre les escarpements et les zones basses (*bajo*) peut favoriser le ruissellement des hautes zones vers le marais tandis que les immersions saisonnières du marais peuvent homogénéiser les assemblages des sols des environnements inondés. L'une des solutions pour évaluer ce phénomène de transport par l'eau est de travailler sous forme de transect continu, comme l'ont fait Watling et al. (2016). Cela permet d'estimer le déplacement et la contamination des assemblages de phytolithes d'un écosystème à l'autre.

D'autres processus de transport de phytolithes ont été énoncés par Piperno (2006). Le feu pourrait, associé au vent, participer au transport des phytolithes. Toutefois, ce processus a été peu étudié (Fredlund et Tieszen, 1994). Dans le cadre de pratique sur brûlis au sein des zones forestières (Nigh et Diemont, 2013), il pourrait être intéressant d'étudier les phytolithes brûlés (Parr, 2006). Enfin, un transport des phytolithes par les herbivores existe (Fredlund et Tieszen, 1994 ; Wallis, 2003) mais il semble assez négligeable et surtout difficile à quantifier.

Pour reprendre le propos de Neumann et al., 2009, il pourrait être possible de détecter des contaminations d'un assemblage lors de l'observation des lames de phytolithes. En effet, certains morphotypes laissent apparaître des faces abrasées ou cassées. Pour exemple, chez les GSSCP, des portions sont souvent cassées, notamment la tige des formes *Bilobate*, et ce sont aussi les morphotypes les plus volumineux, comme les TSLP, qui sont souvent érodés. Si les raisons qui

expliquent la fragmentation de ces phytolithes sont mal étudiées, ces marques pourraient être un moyen d'identifier un transport important de phytolithes et donc une composante allochtone des assemblages de phytolithes. Toutefois, certaines traces d'érosions de morphotypes pourraient également provenir de processus chimiques.

iii). Processus géochimique et diagénèse

Une fois les phytolithes déposés et enregistrés dans les sols et sédiments, il faut évaluer l'impact des processus internes de diagénèse et de réactions physico-chimiques ainsi que les perturbations possibles sur les assemblages.

La destruction chimique des phytolithes consiste en l'hydrolyse de l'opale de silice. Il est attesté que lorsque le pH des sols devient supérieur à 9, la solubilité de 140g/L de la silice diminue et l'opale de silice se dissocie en solution aqueuse (Frayse, 2007). Les sols alcalins sont donc plutôt défavorables à la conservation des phytolithes. Le minimum de solubilité est également atteint pour un pH équivalent à 3, les sols acides étant alors assez peu favorables à la conservation des phytolithes (Frayse et al., 2009). L'incorporation d'aluminium dans la structure de l'opale ne semble pas avoir d'effet conservateur pour les phytolithes dans ces conditions extrêmes de pH (Frayse et al., 2009).

Des études ont également été menées sur la dissolution de la silice en fonction des taxons et des morphotypes. La première observation, qui ressort des études en laboratoire, est que des morphologies différentes de phytolithes ne réagissent pas de la même manière à la dissolution. En 1980, Bartoli et Wilding (1980) ont étudié la dissolution de morphotypes provenant de trois taxons que sont les ligneux, les conifères et les graminées. Ce travail leur a permis de déterminer un gradient de solubilité croissant, allant des dicotylédones aux conifères. Les travaux de Cabanes et al. (2011) sur le blé ont permis de montrer que les phytolithes des inflorescences sont moins stables que ceux des feuilles ou des tiges. Enfin, leur travail, portant sur 4 types de plantes différentes (Cabanes et Shahack-Gross, 2015), est arrivé aux mêmes conclusions de solubilités différentes entre taxons et morphotypes. Plusieurs observations ont été faites pour expliquer ces relations de dissolution. L'étude suggère que l'un des facteurs déterminants est le rapport surface géométrique/volume des phytolithes et que les grandes surfaces sont plus instables et donc sensibles à la dissolution. Dans ces travaux, Cabanes et al., (2011) montrent également que les phytolithes brûlés de blé sont plus sensibles à la dissolution.

L'un des derniers processus de contamination des assemblages de phytolithes correspond aux transports verticaux des phytolithes, favorisés par les circulations de fluides et la bioturbation (Madella et Lancelotti 2012). Des mouvements verticaux des phytolithes dans des sols de forêts, avec une importante activité biologique, ont été mis en évidence, avec une sélection sur certaines formes (Humphreys et al., 2003 ; Farmer, 2005). Fishkis et al., 2010 ont démontré que les mouvements verticaux avaient lieu avec la bioturbation mais ont également identifié des mouvements de phytolithes, avec les eaux résiduelles du sol, qui peuvent atteindre 4cm/an. Ces

mouvements verticaux sont, bien sûr, à prendre en compte dans nos interprétations des assemblages fossiles. Les plus petits morphotypes étant majoritairement mobilisés (Fishkis et al., 2010), il est possible d'évaluer une telle pollution par des accumulations de ces formes sur des niveaux basaux d'unités sédimentaires.

3. Synthèse des choix faits sur l'utilisation des phytolithes dans ce manuscrit

i). Constat sur l'utilité des phytolithes au Petén

Les phytolithes ont été utilisés avec succès dans des écosystèmes forestiers tropicaux semblables d'Amérique du Sud (Dickau et al., 2013 ; Watling et al., 2016). Les études réalisées dans les environnements forestiers du Petén, même si elles ont été conduites avec une méthodologie plus exploratoire, ont montré que les phytolithes ont la capacité de signer la présence de cultivars sur la base de morphotypes diagnostiques (Bozarth et Hansen, 2001) mais également d'indiquer des grands changements environnementaux dans la végétation (Beach et al., 2009 ; Krause et al., 2019). Ainsi, malgré une taxonomie peu précise en dehors des monocotylédones, les phytolithes sont un bioindicateur des écosystèmes tropicaux.

Par ailleurs, les phytolithes se conservent bien dans la plupart des dépôts sédimentaires et dans les sols. La carte de distribution des publications (Fig 2.5) montre que les phytolithes se conservent autant dans les zones ouvertes que dans les zones de forêt et tout aussi bien dans des zones humides que dans des sols de forêts d'altitude, en passant par les paléosols formés en contexte anthropique. En zone de forêt tropicale, les phytolithes sont peu soumis à des transports transversaux par l'écoulement des eaux (Watling et al., 2016) ou par le vent (Alexandre et al., 1997a). Enfin, la silice, qui forme les phytolithes, est résistante aux différentes attaques physico-chimiques que ceux-ci peuvent subir post-dépôt.

Nous avons donc un bioindicateur fiable du couvert végétal et des communautés herbacées, qui a une extension locale et dont la bonne conservation dans les sédiments des forêts tropicales n'a pas un enregistrement régi par la présence d'un plan d'eau pérenne, contrairement au pollen. La conservation des phytolithes n'est donc pas particulièrement impactée dans notre région karstique où les plans d'eau pérenne sont rares et souvent saisonniers. Il est alors nécessaire de définir le protocole d'étude.

ii). De l'espèce à l'assemblage, comment l'étudier ?

Pour étudier un environnement végétal à partir des phytolithes, Neumann et al. (2009) considèrent qu'il existe deux approches principales : l'approche spécifique et l'approche par assemblage. L'approche spécifique repose sur le lien entre producteur et morphotype. Elle implique qu'un morphotype identifié dans une plante actuelle, est indicateur de ce même type de plante dans un autre contexte. L'approche par assemblage repose, quant à elle, sur le fait qu'un même écosystème produit statistiquement toujours le même assemblage, dans le présent

comme dans le passé. Si ces deux approches reposent sur le modèle d'actualisme, leur implication n'est pas la même pour les chercheurs souhaitant utiliser les phytolithes.

A la manière d'une taxonomie, les chercheurs menant une étude selon la première approche produisent des classifications de morphotypes directement réutilisables par leurs pairs. Les phytolithes sont associés à des taxons (des parataxons en réalité) à part entière et sont présentés comme tels dans les études fossiles. C'est la raison pour laquelle il n'est pas étonnant de trouver des publications, géographiquement et temporellement différentes, où un même morphotype de phytolithe n'est pas associé au même taxon. Le cas des morphotypes *Anisopolar*, qui étaient considérés, jusqu'à la publication de Eichhorn et al. en 2010, comme des morphotypes de Marantaceae, en est un exemple. Les classifications sont des objets qui évoluent en fonction des périodes de recherches et des espaces étudiés. De plus, les biais de redondance et de multiplicité impliquent une variabilité très importante chez les phytolithes, invalidant ainsi l'établissement d'une « classification universelle ».

Concernant l'approche par assemblage, à moins de travailler sur des écosystèmes déjà étudiés et caractérisés, chaque nouvelle étude fossile va nécessiter une calibration des assemblages fossiles par une étude des assemblages de sols modernes en lien avec la végétation moderne. Dans cette approche, l'écosystème devient le « taxon », un taxon biogéographique, où les caractères vont correspondre aux valeurs respectives des morphotypes de phytolithes. L'espèce n'étant pas appréciable à cause de la redondance et de la multiplicité, l'approche par assemblage permet de construire une classification des écosystèmes sur la base des phytolithes. C'est la calibration par un écosystème modèle qui permettra ensuite de poser l'hypothèse de la présence d'une espèce.

Dans le cadre de ce travail, l'approche spécifique ne peut pas être, en effet, suffisante pour mener une étude archéologique ou paléoenvironnementale. Si l'on prend le cas du Petén, aucun travail exhaustif ne pourra aboutir à une classification représentative des phytolithes des 700 espèces végétales de la région, ni même des genres. Cet effort systématique est difficilement envisageable de par sa charge de travail et les biais taxonomiques déjà présentés. Le référentiel reposera donc sur des classifications morpho-spécifiques préexistantes des taxons des tropiques américains (Bozarth, 1992 ; Piperno et Pearsall, 1998 ; Iriarte, 2003). Ainsi, en suivant cette approche, notre analyse serait basée sur un système incomplet pour le Petén, non naturaliste, c'est-à-dire non descriptif du matériel botanique de la région, et qui viserait uniquement à appliquer « une recette ». Enfin, et même si un travail taxonomique exhaustif était mené, il serait alors difficile d'aborder la question des mélanges de morphotypes et des biais taphonomiques pour les comparer aux assemblages fossiles.

A l'inverse, l'étude par assemblage est descriptive et surtout discriminante. Elle détermine les caractéristiques d'un objet naturaliste, un écosystème, et va donc le décrire sur ses caractères propres. Ainsi, l'interprétation d'un assemblage fossile reposera sur ses caractères communs avec un objet naturel de référence. L'étude de la région du Petén consistera à analyser les sols des écosystèmes forestiers et la description de ces écosystèmes se fera sur la base des

morphotypes de phytolithes et non sur les espèces qui ne sont pas abordables avec ces derniers. Ce manuscrit va donc s'intéresser uniquement aux assemblages de phytolithes afin de caractériser les écosystèmes.

iii). Des approches complémentaires à l'étude des assemblages de phytolithes

L'étude par assemblage passe donc par une logique numérique : un dénombrement des phytolithes est effectué jusqu'à atteindre un seuil statistique où le signal sera jugé comme fiable pour un échantillon. On considère que ce seuil est atteint pour 200 morphotypes « diagnostiques » (*Globular*, *TSLP*, *GSSCP*, *Papillae*, *CAP* ; Tab 2.1) comptés (Strömberg, 2009 ; Zurro, 2018). Les formes à répartition écologique/taxonomique plus large (*Blocky*, *Bulliform flabellate*, *Elongate* ; Tab 2.1) sont également dénombrées en parallèle, dans le but de trouver un signal écologique (Bremond et al., 2005 ; Garnier et al., 2013).

Cette approche comptable nous permet également de traiter les tableaux de comptages avec des démarches opératoires. En appui, l'interprétation des assemblages peut en effet être testée à l'aide d'analyses statistiques multivariées. Mais c'est surtout le traitement par indice qui s'est développé, ces dernières années, dans l'interprétation des assemblages de phytolithes (Alexandre et al., 1997 ; Bremond et al., 2005b ; Garnier et al., 2013).

La méthode indicielle consiste à définir des rapports mathématiques entre les valeurs de morphotypes afin d'en modéliser un paramètre de l'écosystème. Aujourd'hui, plusieurs indices existent pour traiter des paramètres divers tels que la couverture végétale, la disponibilité en eau ou encore le régime métabolique des associations de Poaceae. Seul l'indice D:P est présenté ici, puisque compatible avec nos environnements forestiers et notre classification de morphotypes.

L'indice D:P a été développé en Afrique pour modéliser en un chiffre, supérieur à 0, la couverture arborée d'un écosystème (Alexandre et al., 1997). Comme son nom l'indique, l'indice D:P consiste en un rapport entre les morphotypes « D », liés aux arbres dicotylédones, et les morphotype « P », liés aux graminées. Les morphotypes pris en compte dans « D » (Alexandre et al., 1997 ; Strömberg, 2002 ; Testé et al., 2020) et dans « P » (Alexandre et al., 1997 ; Barboni et al., 1999 ; Bremond et al., 2005a ; Garnier et al. 2013 ; Testé et al., 2020) varient en fonction des différents travaux (Garnier, 2013). A plusieurs reprises, ce rapport D:P a été calibré sur la couverture végétale des écosystèmes modernes (Alexandre et al., 1997 ; Bremond et al., 2005a ; Strömberg, 2009). Malgré toutes ces variations, l'indice D:P fonctionne toujours selon les mêmes plages de valeurs : les valeurs inférieures à 1 indiquent plutôt les milieux ouverts tandis que les valeurs supérieures à 1 indiquent les milieux plutôt forestiers. Aussi, il semblerait qu'il soit nécessaire de calibrer l'indice pour chaque zone géographique étudiée, en raison de la diversité des réponses de l'indice aux particularités botaniques des écosystèmes (Strömberg, 2009 ; Garnier et al., 2013).

4. Proxys complémentaires à l'étude des phytolithes

Si les phytolithes semblent être un bioindicateur sérieux pour les reconstitutions paléoenvironnementales en Amérique, il comporte, comme tout proxy, des biais en termes de résolution taxonomique, taphonomique, spatiale... que peuvent venir compléter d'autres proxys aux résolutions additionnelles. Dans la présentation des publications sur les phytolithes du continent américain (Fig 2.5), certains chercheurs ont, en effet, complété leurs études sur les phytolithes par des proxys comme les spicules d'éponges, le pollen ou encore le $\delta^{13}C$ ou à l'inverse ont complété une étude sur la géomorphologie et la carpologie par l'étude des phytolithes. Il est intéressant d'évoquer les différents bioindicateurs qui pourraient venir compléter nos travaux sur les phytolithes que ce soit à l'échelle locale ou régionale.

i). Approcher une meilleure reconstitution de la végétation ?

Malgré la possibilité de différencier les écosystèmes forestiers tropicaux (Dickau et al., 2013 ; Watling et al., 2016), les biais taxonomiques liés aux phytolithes ne permettent pas l'identification de taxon au niveau générique ou spécifique. Pourtant, certaines espèces ou certains genres sont typiques d'écosystèmes et apportent des informations importantes sur leur évolution.

Pour suivre de manière précise les variations des forêts, les pollens sont majoritairement utilisés dans les zones tropicales mayas (Islebe et al., 1996 ; Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2006 ; Carrillo-Bastos et al., 2012). Certaines études en Amérique ont réussi à étudier parallèlement les deux proxys. Trombold et Israde-Alcantara (2006) utilisent les pollens et les phytolithes pour étudier des terrasses agricoles au Mexique. Dans cette étude, les phytolithes et les pollens sont tous les deux bien conservés mais ce sont les pollens qui indiquent la présence des cultivars alors que les phytolithes signent plutôt un environnement ouvert avec des morphotypes GSCP. Trombold et Israde-Alcantara jugent l'adéquation des bioindicateurs comme concluante. Si Beach et al. (2009) n'étudient pas sur les mêmes niveaux les pollens et les phytolithes, les données obtenues sur les zones humides sont complémentaires. Dickau et al. (2013) utilisent, en Bolivie, les pollens pour compléter les données de phytolithes sur la question du couvert forestier et des familles d'herbacées. Ainsi, certaines plantes qui n'apparaissent pas avec les pollens sont présentes chez les phytolithes (ex : les Marantaceae). Dickau et al. (2013) sont assez enthousiastes quant à l'utilisation de ce double proxy et indiquent qu'il est possible de se passer des environnements de lacs et de lagunes pour reconstituer les paléoenvironnements. Les mêmes observations ont été faites pour d'autres zones tropicales, comme en Thaïlande (Kealhofer et Penny, 1998). L'utilisation croisée de ces bioindicateurs semble concluante. Les phytolithes vont apporter une information plus précise sur les communautés d'herbacées, complémentaire à l'information taxonomique précise sur les dicotylédones ligneuses fournie par les pollens. En revanche, ces deux bioindicateurs ne semblent pas forcément se conserver dans les mêmes milieux de dépôts, les phytolithes étant plus ubiquistes.

L'étude des charbons par l'antracologie donne également de bons résultats dans les basses-terres mayas (Lentz et al., 2015 ; Dussol, 2017). Les phytolithes et les charbons ont été utilisés conjointement à plusieurs reprises en Amérique latine. Piperno et Becker (1996) reconstituent les variations de végétation ainsi que l'intensité et la taille des incendies en Amazonie au cours de l'Holocène. Ces deux bioindicateurs apportent des informations différentes et Piperno indique une nouvelle fois la possibilité de se passer des lacs et des lagunes pour reconstituer les paléoenvironnements continentaux grâce à l'utilisation de phytolithes. En 1994, Piperno avait également utilisé les charbons et les phytolithes pour reconstituer les paléoenvironnements forestiers et les cycles de feu. Cette association a également fonctionné en zone tropicale chinoise (Gu et al., 2008) : les phytolithes ont permis de reconstituer les dynamiques des écosystèmes tandis que les charbons ont permis d'identifier les événements d'incendie, les deux réunis conduisant à interpréter les événements de sécheresse climatique. L'utilisation conjointe de ces deux bioindicateurs n'apporte pas, à proprement parler, des informations complémentaires sur la végétation mais elle peut permettre de traiter des questions d'interactions sociétés-environnements ou de changements climatiques passés.

Les travaux de carpologie en archéologie ou en paléoenvironnement sont assez peu visibles en zone maya. En revanche, en Amérique tropicale, des études couplant les phytolithes et les graines ont permis de mener des travaux paléoenvironnementaux (Ramírez et al. 2019). Cette étude conjointe des phytolithes et des graines a permis de reconstruire la végétation passée d'une zone humide et d'identifier des grands changements dans le régime hydrologique de la zone humide étudiée. Cette association de bioindicateurs végétaux semble être peu utilisée à ce jour dans les zones tropicales.

ii). Les diatomées, les spicules d'éponges et les mollusques : indicateurs des variations hydrologiques

Dans les lames microscopiques, les phytolithes sont accompagnés par d'autres microfossiles siliceux tels que les diatomées et les spicules d'éponges (Fig 2.9). En zone maya, les diatomées sont, en général, utilisées pour signer les variations de productivité et de profondeur de plans d'eau (Bradbury, 1971 ; Rosenmeier et al., 2004). En zone maya, Trombold et Israde-Alcantara (2005) ont étudié les phytolithes et les diatomées sur d'anciennes terrasses agricoles. La présence de diatomées sur ces zones non-inondables leur ont permis de justifier d'anciens apports d'eau anthropique. Ailleurs, les phytolithes ont également été utilisés avec les diatomées pour reconstruire des habitudes saisonnières dans le régime alimentaire de Maoris (Horrocks et al., 2003). Comme chez les diatomées, les spicules d'éponges ont été étudiées en parallèle de travaux paléoenvironnementaux ou archéologiques et sont indicateurs de zones aquatiques (Bozarth et Guderjan, 2004). Récemment, Rasbold et al. (2019) ont mené une étude paléoenvironnementale croisant les phytolithes et les spicules d'éponges afin de reconstituer les variations hydrologiques et environnementales passées de la région du Pantanal (Brésil). Ce travail a permis de montrer une bonne complémentarité entre les

phytolithes et les spicules d'éponges pour interpréter les variations environnementales de la zone humide. En effet, l'ouverture du milieu marqué par les augmentations de morphotypes de Poaceae correspond à une forte augmentation de la richesse en spicules d'éponges. Les spicules d'éponges vont donc signer les variations d'hydrologie quand les phytolithes vont répondre avec la signature des changements d'écosystèmes.



Figure 2.9 – Photographies de types de spicules communes dans les plans d'eau de Naachtun.

Les mollusques sont également des fossiles que l'on retrouve en grand nombre dans les sédiments de zone humide de la zone maya. De nombreuses études en zone maya ont utilisé les faunes de mollusques pour étudier les variations d'hydrologie des zones humides (Covich, 1976 ; Bradbury et al., 1990). Dans la littérature, les études couplées entre les phytolithes et les mollusques, pour des reconstitutions paléoenvironnementales, sont inexistantes. Malgré le potentiel reconnu des mollusques comme bioindicateurs, ils semblent relativement peu utilisés dans les zones tropicales.

iii). Choix des bioindicateurs complémentaires pour notre terrain d'étude

Parmi les bioindicateurs présentés précédemment et complémentaires des analyses de phytolithes, seule une partie a pu être sélectionnée dans cette étude du Petén. Cette sélection repose en partie sur la disponibilité des archives fossiles.

Le pollen, qui semblait être le bioindicateur le plus propice à l'étude de la végétation passée du site de Naachtun, s'est finalement avéré mal conservé dans les sédiments du *bajo*. La dizaine de tests menés sur des niveaux sédimentaires différents, dans et en dehors de la zone humide pérenne, n'a pas permis d'identifier des assemblages interprétables. Les tamisages des sédiments argileux du *bajo* ont également indiqué de très faibles concentrations de charbons ou de graines identifiables. Ainsi, les phytolithes sont les seuls bioindicateurs de la paléovégétation qui sont conservés dans les sédiments de Naachtun.

En revanche, l'ensemble des autres bioindicateurs, présentés comme complémentaires des phytolithes et pouvant apporter un signal hydrologique, sont bien conservés dans les sédiments. Les spicules (Fig 2.9) et les diatomées, qui possèdent des biominéralisations en silice, sont incorporés dans les préparations de phytolithes. Ainsi, il est possible de les observer directement sur les lames minces au microscope optique. Si une taxonomie fine n'est pas envisageable dans ce travail, l'évaluation de leur concentration dans les échantillons peut déjà apporter des

informations quant aux niveaux d'eau passés dans les zones humides du *bajo*. Quant aux mollusques, leurs coquilles sont également très bien conservées et sont particulièrement riches dans les sédiments de Naachtun. La plupart de ces mollusques sont des espèces d'eau douce qui nous donnent des informations écologique et hydrologique par une étude de leurs assemblages taxonomiques, mieux décrits dans le Petén (Covich, 1976 ; Bradbury et al., 1990).

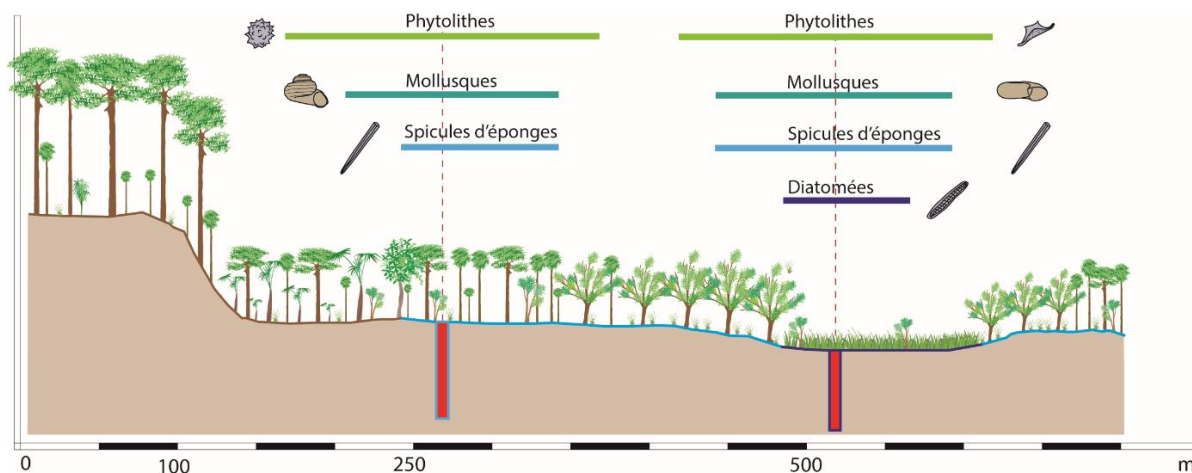
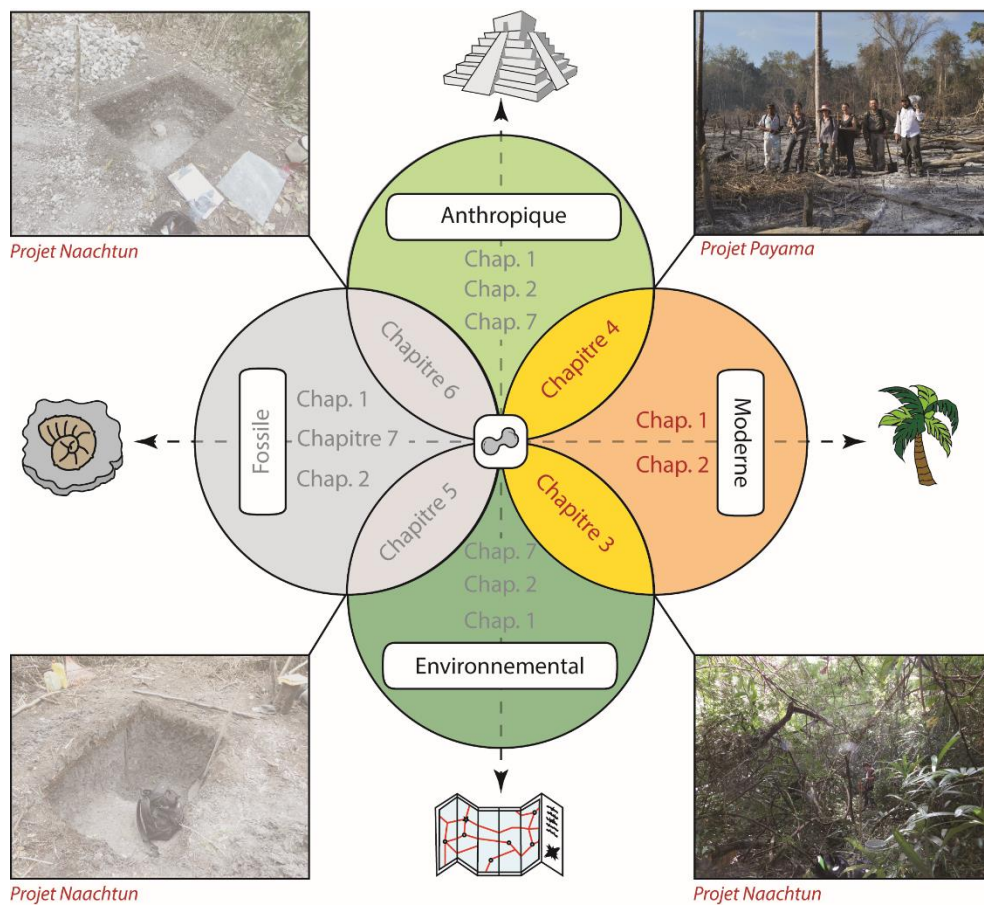


Figure 2.10 – Schéma représentant la distribution spatiale de l'information taxonomique/écologique fournie en fonction des 4 grands types de bioindicateurs de l'étude.

L'incorporation de ces trois bioindicateurs supplémentaires dans notre étude multiproxy permet une réflexion sur les niveaux de lecture dans les reconstitutions paléoenvironnementales mais également sur la dimension spatiale (Fig 2.10). Alors que les phytolithes donnent une information sur la végétation locale (quelques dizaines à une centaine de mètres ; Fredlund et Tieszen, 1994 ; Watling, 2016), les mollusques, spicules et diatomées vont également donner une information locale mais sur l'hydrologie. Les diatomées seront plutôt indicatrices des zones d'eau pérenne locale (Testé et al., 2020), du fait de leur mode de vie planctonique pouvant suivre les variations saisonnières du plan d'eau. Les spicules d'éponges correspondent aux restes d'organismes spongiaires en cours d'enfouissement qui sont déplacés par les mouvements d'eau saisonniers et peuvent recouvrir l'ensemble de la surface pris par le plan d'eau. Enfin, les mollusques, vivant dans des microhabitats, vont être plutôt indicateurs des variations locales du niveau d'eau.

PARTIE 2

LES RÉFÉRENTIELS ACTUALISTES : NAACHTUN & UAXACTUN



- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 3 -

Les phytolithes de Naachtun (Petén, Guatemala) :
Développement d'un référentiel moderne pour la caractérisation des communautés végétales dans les basses terres tropicales mayas

Ce chapitre est constitué par un article publié dans *Review of Paleobotany and Palynology* :

Testé, M., Garnier, A., Limondin-Lozouet, N., Oxlaj, E., Castanet, C., Purdue, L., Lemonnier, E., Dusol, L., Nondédéo, P., 2020. The phytoliths of Naachtun (Petén, Guatemala): Development of a modern reference for the characterization of plant communities in the Maya Tropical Lowlands. *Review of Palaeobotany and Palynology* 272, 104130.

<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.104130>

Les questions paléoenvironnementales sont centrales pour comprendre l'évolution croisée des sociétés et des écosystèmes dans les basses-terres mayas. Les phytolithes, contrairement aux microfossiles organiques, sont bien conservés dans les sédiments des basses terres, mais sont rarement utilisés comme substituts paléoenvironnementaux. A Naachtun, les sédiments du *bajo* sont propices à l'étude de ces bioindicateurs : ils y sont bien préservés avec une bonne diversité.

Toutefois, pour mieux interpréter et reconstruire les signatures et changements paléoécologiques à l'aide des phytolithes, il est nécessaire de fournir une calibration moderne aux assemblages en lien avec les communautés végétales modernes. Dans le cas de Naachtun, nous avons donc réalisé un référentiel actuel des assemblages phytolithes associant une étude moderne des écosystèmes présents sur le territoire du site.

L'étude se base sur 43 quadrats écologiques répartis en 4 transects à travers les forêts hautes du site et les savanes et forêts du *bajo* nord. La végétation moderne de chaque quadrat a été étudiée en parallèle d'un prélèvement des 3 cm de sols de surface. Les quadrats ont été classés au sein de six types d'écosystèmes modernes, et leurs assemblages de phytolithes comparés à l'aide d'un diagramme relatif des distributions et une analyses statistique multivariées.

L'étude a montré qu'il est possible de discriminer les écosystèmes sur la base des assemblages de phytolithes. Plusieurs niveaux de lecture du diagramme ressortent : i) une différenciation des milieux forestiers et ouvert, ii) une identification des environnements humides, iii) une discrimination sur la base des phytolithes de plantes de sous-bois. Les indices D/P et LU développés pour ces assemblages permettent, respectivement, de fournir une signature complémentaire de l'état du couvert végétal, et d'identifier la présence de sous-bois herbeux dans les zones forestières, ou de lisières forestières dans les zones de savane. Ce premier référentiel moderne de phytolithes en zone maya contribue au développement de reconstructions paléoécologiques pour le territoire de Naachtun.



The phytoliths of Naachtun (Petén, Guatemala): Development of a modern reference for the characterization of plant communities in the Maya Tropical Lowlands

Marc Testé ^{a,b,*}, Aline Garnier ^{c,a}, Nicole Limondin-Lozouet ^a, Enecon Oxlaj ^d, Cyril Castanet ^{e,a}, Louise Purdue ^f, Eva Lemonnier ^{b,g}, Lydie Dussol ^{f,g}, Philippe Nondédéo ^g

^a Laboratoire de Géographie Physique, LGP CNRS-UMR8591, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France

^b Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 191 rue Saint Jacques, 75005 Paris, France

^c Université de Paris Est Créteil - Val de Marne, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France

^d Organización de Manejo y Conservación, OMYC, Uuaxactún, Petén, Guatemala

^e Université Paris 8 Vincennes - Saint Denis, 2 Rue de la Liberté, 93526 Saint-Denis, France

^f Université Côte d'Azur, CNRS, CEPAM, Pôle Universitaire Saint Jean d'Angély SJA 3, 24, avenue des Diables Bleus, 06357, Nice Cedex 4, France

^g CNRS, Archéologie des Amériques, Maison Archéologie Ethnologie, 21, allée de l'Université, 92023 Nanterre, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 January 2019

Received in revised form 18 September 2019

Accepted 21 October 2019

Available online 25 October 2019

Keywords:

Phytoliths assemblages

Naachtun

Maya Lowland, Petén forests

Sival wetland

Phytolith indexes

ABSTRACT

Phytoliths, unlike pollen and charcoal, are frequently conserved in sediments in the Maya lowlands but are rarely used as paleoenvironmental proxies. To better interpret and reconstruct paleoecological signatures and changes, it is necessary to provide current analog of fossil assemblages. To do so, we selected six modern ecosystems and differentiated them by their soil phytolith assemblages in the ancient Maya city of Naachtun (northern Petén, Guatemala). We studied the plant communities and relative phytoliths frequencies in surface soils on 4 north-south vegetation transect, composed of 43 quadrats. These transects cross forests and savannahs in low swampy areas North and South of the site, and hill forest in its center, where the city was built. Quadrats were statistically compared using multivariate analyses (CA). Six types of plant communities were characterized by their phytolith assemblages, as well as on the presence of siliceous bioindicators such as diatoms and sponges. The D/P and LU indexes developed for these assemblages allow us to provide a precise signature of the current vegetation cover, and identify the presence of undergrowth in forest areas, or forest edges in savannah areas. This first modern phytolith reference for the Maya area will contribute to the development of paleoecological reconstructions for this zone.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Today, while more and more studies are focusing on the systemic collapse of our modern civilization (Meadows et al., 2004; Ehrlich and Ehrlich, 2013; Servigne and Stevens, 2015), some are interested in ancient societies that have disappeared as a way of addressing modern social or environmental crises (Tainter, 1988; Diamond, 2005). The Maya societies of the Yucatán Lowland, well known for their huge architectural remains, are a good example. Studies testify to two major collapse events that occurred in the 2nd century (pre-classical collapse) and the 10th century (classical collapse) CE. While these collapse events are sometimes presented as the result of overly intensive environmental exploitation (Abrams and Rue, 1988; Hansen et al., 2002; Lentz and

Hockaday, 2009; Turner and Sabloff, 2012), other authors question this hypothesis by citing the Maya's considered and sustainable management of forest and plant resources (Fedick, 2010; Mcneil, 2012; Lentz et al., 2015; Thompson et al., 2015).

Located in the extreme north of Guatemala (Fig. 1), four kilometers from the border with Campeche (Mexico), the archeological site of Naachtun was first surveyed in 1922, by SG. Morley, and 10 years later by CL. Lundell (Lundell, 1932). Since 2004, Naachtun has been the site of archeological and paleoenvironmental studies (Reese-Taylor et al., 2005; Nondédéo et al., 2012, 2013) and is also one of the location of the Naachtun-Pacunam Lidar project, which aims to map the geographical and archeological characteristics of Maya sites in northern Guatemala (Canuto et al., 2018). Given its well-preserved monumental remains, the site holds a certain archeological interest. Indeed, the first archeological evidence of occupation dates to the 5th century BCE, although the development of the city only began in earnest in the 2nd century CE; that is, at around the time of the Late Preclassic Maya

* Corresponding author at: Laboratoire de Géographie Physique, LGP CNRS-UMR8591, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France.

E-mail address: marc.teste@lgp.cnrs.fr (M. Testé).



Fig. 1. Map of main archeological sites of the Mayan lowlands and the semi-evergreen tropical forest location. (color)

collapse (Hansen et al., 2002). Located halfway between Tikal and Calakmul, the two great Maya kingdoms of Petén during the Classic period, Naachtun played the role of a regional political center and may have counted several thousand inhabitants. The site was eventually abandoned around 950 CE, relatively late period in comparison to the other capitals of the Petén region (Nondédéo et al., 2013).

In order to understand the link between past cultural and environmental changes, this study uses both the archeological context and geomorphological/paleoenvironmental context. Naachtun is located on a large hilly escarp and is bordered to the north and south by two

depressions of the karstic polje type (Castanet et al., 2016), called *bajos*, with dispersed perennial wetlands, locally called *Sival* (Fig. 2). During the wet season, these *Sival* are fed by water and result in considerable palustrine-alluvial sedimentation. These sedimentary sequences located in the northern *bajo* cover the periods of occupation of the Naachtun site and create a good trap for the bioindicators (phytoliths, mollusks, etc.) used for paleoenvironmental reconstructions.

In the Maya Lowlands, most bio-proxies used in paleoenvironmental studies to reconstruct past vegetation dynamics are either pollen (Islebe et al., 1996; Leyden, 2002; Carozza et al., 2007; Wahl et al., 2006, 2013)

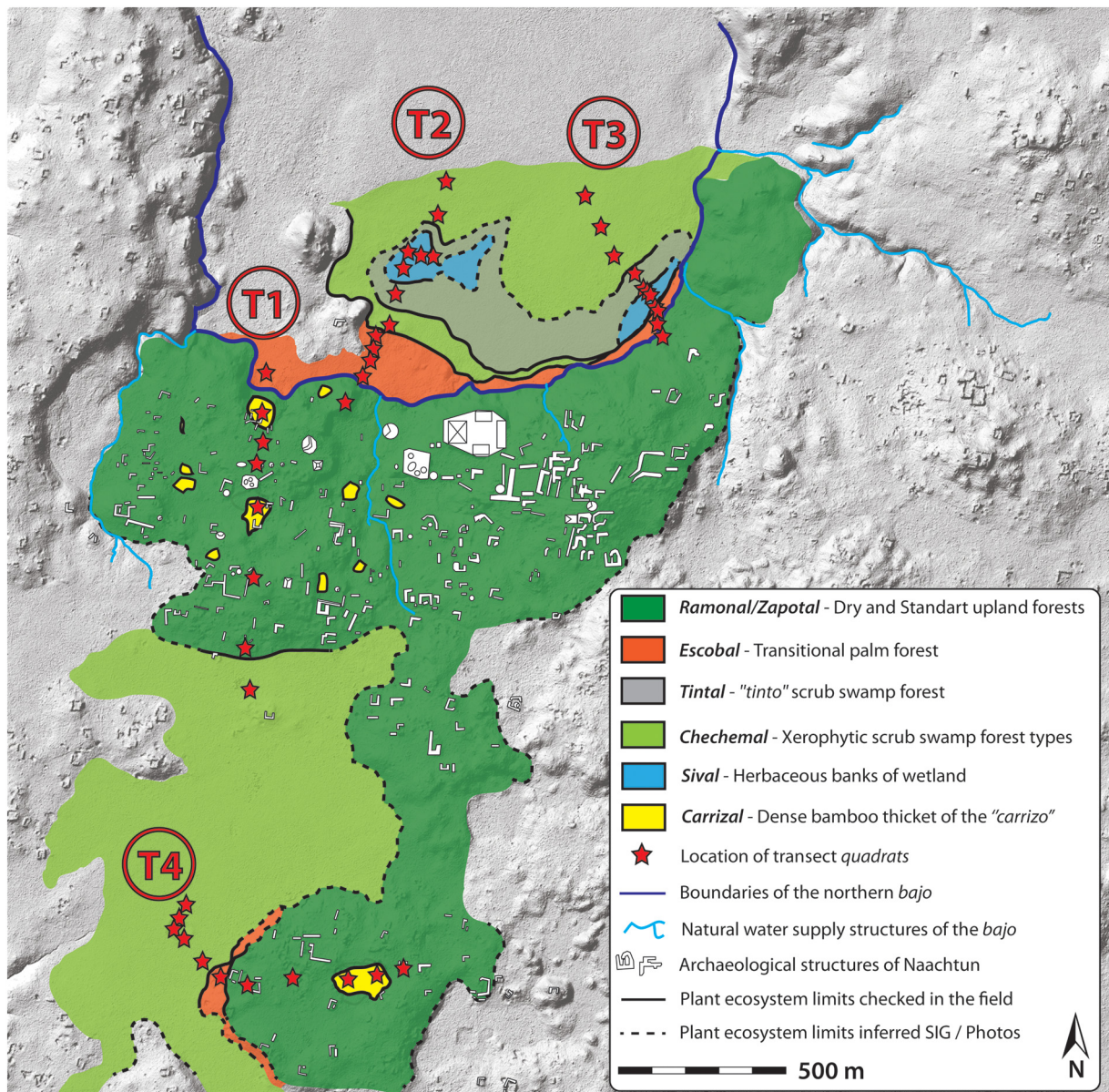


Fig. 2. Map of plant communities and ecological quadrats location. (color)

or charcoal (Lentz and Hockaday, 2009; Lentz et al., 2015; Dussol et al., 2017). However, in Naachtun's *bajo* records, pollen are poorly preserved, while the identifiable charcoals are too diluted to allow for systematic study. This poor conservation led us to look for new bioindicators of past vegetation changes. Due to their siliceous structure, phytoliths are resistant to oxidation and are well preserved in such tropical environment deposits (Alexandre et al., 1997; Madella and Lancelotti, 2012; Piperno, 2006; Watling et al., 2016). They also allow good monitoring of herbaceous environments thanks to the morphotype diversity of Cyperaceae and Poaceae (Twiss et al., 1969; Fredlund and Tieszen, 1994; Lu and Liu, 2003; Strömberg, 2004; Iriarte and Paz, 2009; Novello et al., 2012). Moreover, unlike pollen, phytoliths are a good local bioindicator of plant formations (Madella and Lancelotti, 2012; Piperno, 2006). However, in the Maya zone, research involving phytoliths is scarce and has been conducted using only a few particular morphotypes (Beach et al., 2009), or in specific archeological contexts (Bozarth and Guderjan, 2004; Abramiuk et al., 2011).

Given the lack of phytolith studies in this forest region, it is difficult to interpret fossil assemblages in the sedimentary archives. The

main problem in forest environments is that phytoliths do not allow for taxonomic discrimination between woody dicotyledons (Alexandre et al., 1997; Piperno, 2006; Mercader et al., 2009; Collura and Neumann, 2017). However, in similar environments of tropical lowland forests, like the Amazon rainforest, recent studies have pointed to the possibility of characterizing the different forest ecosystems by studying phytolith assemblages (Dickau et al., 2013; Watling et al., 2016).

The aim of this study is, therefore, to assess the potential of phytoliths in the Maya Lowlands to serve as a good proxy of plant formations. To achieve this purpose, a botanical study has been carried out on 43 ecological quadrats located along four transects crossing the different ecosystems of the Naachtun site. For each quadrat, surface soils were sampled and phytolith assemblages analyzed using the general counting and index approaches. The link between phytolith assemblages and plant communities was tested using a distribution diagram, and also a statistical study using a component analysis. In this paper, we will compare the different phytolith indexes and propose a new index to better establish the landscape characteristics of these communities.

2. Study area

2.1. Climate and geology

The department of Petén is located in the southern part of the Petén tropical forest covering the central lowlands of the Yucatán peninsula, also referred as the Maya Lowlands (Fig. 1). The vegetation of Petén is mainly subject to two control factors: precipitations and regional geomorphology (Sánchez-Sánchez and Islebe, 2002; Carrillo-Bastos et al., 2012). Indeed, seasonal latitudinal migrations of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) and the North Atlantic High cause considerable seasonality of precipitation (Hastenrath, 1976, 1984; Brenner et al., 2001; Hodell et al., 2005; Carrillo-Bastos et al., 2012). Thus, most of the rainfall, between 1000 and 1500 mm, is concentrated in the period from May to December, while the period from January to April corresponds to a dry season. Due to the intertropical position of the peninsula, temperatures remain relatively stable throughout the year (Wilson, 1980). These umbrothermal conditions correspond to an Am-type climate in the Köppen classification (Pennington and Sarukhán, 2005). The regional geomorphology of Petén is a vast Meso-Cenozoic carbonate platform, composed mainly of limestone, at low altitude (250–300 m). The fractures and heterogeneities of the limestone bedrock have produced karstified landscapes resulting in hills alternating with depressions (*bajos*) (Dunning et al., 2002; Beach et al., 2008, 2009). Consequently, differences in hydrology and soil composition are also observed, with thin layers of well-drained rendosol on hill and slope areas, and seasonally waterlogged vertisol-histosol in *bajo* areas (Beach et al., 2008).

2.2. The plant formations of Petén

The Petén forest was first described in the 1930s by Lundell (1937) and was defined as a semi-sempervirent tropical forest. However, this ecological classification does not reflect the true diversity of forest ecosystems found in the different geomorphological contexts of Petén. The hill zones are covered by high semi-evergreen forests (30–40 m) with calcareous plant associations. The wide trees, characteristic of these forests, belong mostly to the Burseraceae, Fabaceae, Meliaceae, Moraceae, Sapindaceae, and Sapotaceae. The relatively sparse undergrowth is occupied by Arecaceae and Piperaceae shrubs, and a small number of grassy plants. The *bajo* areas are covered by a low forest (5–8 m), where plant associations are adapted to clayey soils and the seasonal submersions and drying periods. These are mainly composed of species belonging to the Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae and Myrtaceae families. The *bajo* forest undergrowth is relatively bare, with very few grasses. In addition to these two main forest ecosystems, it is possible to find other vegetation types, such as palm forests, pine forests, or humid or dry savannahs, adapted to local geomorphological conditions (Lundell, 1937; Martínez and Galindo-Leal, 2012; Schultze and Whitacre, 1999). Currently, the Petén forests are less populated than during the Maya period (Canuto et al., 2018).

3. Methodology

3.1. Vegetation study and soil sampling

The vegetation study was conducted during two fieldwork sessions at the end of the dry season in March 2016 and April 2017. We have conducted ecological transects crossing all altitude and humidity domains. Thus, we defined three north–south oriented transects in the north *bajo* area (T1, T2, and T3), and one north–south/west oriented transect (T4), over distances of about one kilometer. These transects therefore covered different plant formations of forests and herbaceous areas from hills and *bajo* (Fig. 2). Along these transects, we identified areas where plant communities were changing. Depending on the extent of a plant community, one to two blocks, each of about 100m², have

been positioned in the middle of it. On each quadrat, we recorded the plant species presences based on local common names and annotated their relative quantity. Vegetation cover values were estimated from colorimetric processing (light rate [light-white pixels] relative to vegetation coverage rate [dark pixels]) of forest cover photographs taken vertically and to up. Finally, for the phytolith analysis, only a few grams of the surface portion of the A1 horizon (the A0 litter having been removed from the sample) were taken from several locations in each of the quadrat. All samples were mixed to create a single sample of approximately 100 g by quadrat. It allowed us to prevent our sampling producing ultra-local biases in phytolith assemblages.

The ecological survey was carried out with the help of a local forester able to identify the plants by their vernacular names in Spanish and/or Mayan. The vernacular names were then translated into scientific names using the available literature and databases (Lundell, 1937; Standley and Steyermark, 1946; Schultze and Whitacre, 1999; Martínez and Galindo-Leal, 2012; Atran et al., 2004), while some plant specimens were compared with taxonomic types from the Paris Herbarium in France's National Museum of Natural History (MNHN). However, the local nomenclature of Naachtun plants contains many synonymies (one local name = different taxa) or polynomials (several local names = one taxon). To resolve this issue, we chose to apply taxonomic corrections, such as the following:

- Multiplication of nomen: *zakate* is used to designate both *Kyllinga pumila*, a Cyperaceae, and *Olyra latifolia*, a Poaceae. In these cases, the vernacular name, nomen, was used several times, to allow for better taxonomic and ecological representativeness.

- Construction of species complex: *Manilkara chicle*, *Pouteria glomerata*, *Pouteria reticulata*, *Sideroxylon tepicense*, trees belonging to the Sapotaceae family, are all named *zapote* or *zapotillo*. In such cases, we decided to group all these scientific names under the nomen *zapote*.

Phytoliths do not allow for differentiation between woody dicotyledon species. We, therefore, chose to create species complexes for trees (62 nomens associated with woody dicotyledons). Phytoliths are, however, a good tool for characterizing monocotyledon families, such as Arecaceae, Cyperaceae, Commelinaceae, Musaceae, and Poaceae (Piperno, 2006; Honaine et al., 2009; Eichhorn et al., 2010; Novello et al., 2012; Chen and Smith, 2013). With some families, it is sometimes possible to determine the genus or species. Thus, for herbaceous plants, we multiplied the nomens to allow for better ecological monitoring using phytoliths (18 nomens). Finally, from the 157 initial occurrences, 75 nomens were assigned to a genus and five nomens to a family (See Table 3 in appendix). It should be noted that these sampling and identification methods were designed to be used primarily on ecological rather than taxonomic assemblages.

Plant associations were studied by quadrat using a statistical study of nomen occurrences. Each nomen class selected was classified for each of the quadrats based on the following criteria: Absent (0 occurrences), Present (1 to 8 occurrences) or Abundant (> 8 occurrences) (Table 3). These occurrence data (coded 0, 1 and 2 respectively) were studied using a hierarchical bottom-up classification coupled with a factor analysis of the correspondences. This statistical methodology aimed to verify the representativeness of the assemblages across the site and compare them with the literature (Lundell, 1937; Schultze and Whitacre, 1999; Martínez and Galindo-Leal, 2012).

3.2. Preparation and counting of phytoliths

The procedure for phytolith extraction was adapted from Piperno (2006). For approximately 20 g of soil: (1) Organic matter was destroyed using hydrogen peroxide (H₂O₂), (2) clays were deflocculated using sodium hexametaphosphate (SHMP; 40 g/L), (3) sand and gravel were removed by sieving at 250 µm, (4) clays were eliminated by draining and (5) amorphous siliceous matter was concentrated and extracted by densimetric sorting using sodium polytungstate diluted to a density of 2.30–2.35.

The dried residue was mounted on microscope slides in immersion oil to allow rotation and 3-D analysis. Observations, identifications and counts were performed under a microscope at magnifications between $\times 450$ and $\times 630$. As counting methods influence the ecological interpretation of phytolith assemblages, we followed recommendations in counting at least 200 diagnostic phytolith morphotypes for each sample (Strömberg, 2009; Zurro, 2018). In addition to these diagnostic phytoliths, we also counted non-diagnostic phytolith morphotypes, sponge spicules, and diatoms. The results are presented in a diagram of the relative abundances of diagnostic morphotypes. The diagram also includes the relative abundances of non-diagnostic shapes and bioindicators, calculated as the total sum of all particles counted.

3.3. Classification of phytoliths

Although phytolith assemblages in the forests of Petén have not yet been studied, other forests in intertropical zones have been the subject of studies, such as those from Amazonia (Piperno, 1988; Dickau et al., 2013; Watling et al., 2016), Africa (Alexandre et al., 1997; Barboni et al., 1999; Runge, 1999; Aleman et al., 2012), Indonesia (Chabot et al., 2018) and New Guinea (Boyd et al., 1998). Other researchers conducted on current Central and South American plant phytoliths complete this first overview (Piperno and Pearsall, 1998; Iriarte, 2003; Iriarte and Paz, 2009; Watling and Iriarte, 2013). Our phytolith classification (See Table 1.) is based on these regional studies and other work (Iriarte, 2003; Eichhorn et al., 2010; Fenwick et al., 2011; Collura and Neumann, 2017; Neumann et al., 2017), as well as the nomenclature of the ICPN working group (Madella et al., 2005).

3.3.1. Sclereid shapes (Plate I, a–c)

The sclereids represent a particular group associated with the sclerenchyma of woody dicotyledons (Piperno, 2006) and for which the nomenclature is not well established. Many morphotypes have been described in the literature; the majority exceed 50 μm and can reach up to 200 μm . Some are elongated (Postek, 1981; Runge, 1999; Piperno, 2006; Garnier et al., 2013) or polyhedral with a smooth, faceted surface and relatively thick edges (Kealhofer and Piperno, 1998; Runge, 1999; Neumann et al., 2009; Garnier et al., 2013). Other morphotypes are larger, three-dimensional and irregular in shape, with a smooth surface (Runge, 1999; Strömberg, 2004; Garnier et al., 2013). It is also possible to find variants of this more regular morphotype in the form of large, smooth polyhedral with well-defined faces (Mercader et al., 2009; Garnier et al., 2013). Finally, smaller, undefined shapes, between 20 and 60 μm , may show protuberances or growths on their surface (Garnier et al., 2013; Collura and Neumann, 2017). All of these morphotypes, belonging to the large sclereid class, have been identified in the leaves, wood, and bark of many woody plants (Runge, 1999; Piperno, 2006; Collura and Neumann, 2017).

3.3.2. Globular shapes (Plate I, d–k)

Spherical to ellipsoid shapes can be differentiated from their ornamentation. Globular shapes with a smooth surface have been identified many times in the tissues of woody dicotyledons (Wilding and Drees, 1973; Piperno, 1988; Iriarte and Paz, 2009; Watling and Iriarte, 2013), as well as in some monocotyledons (Runge, 1999; Bremond et al., 2004). The globular decorated shapes (warty, rough, crenelated, aggregate, etc.; Plate I, f–g) described in the literature (Piperno, 1988; Alexandre et al., 1997; Kealhofer and Piperno, 1998; Barboni et al., 1999; Iriarte and Paz, 2009; Garnier et al., 2013) are produced in the fruits, leaves and wood of woody dicotyledonous. Sometimes the globular morphotypes are formed of aggregate particles, named globular compound (Garnier et al., 2013; Collura and Neumann, 2017), or angular particles, named globular nodular (Neumann et al., 2009; Collura and Neumann, 2017). In our study, all these shapes are classified under the “globular mixed” category.

We chose to create a separate category for globular faceted morphotypes (Plate I, d), as they are characteristic of the Cucurbitaceae family (Piperno et al., 2000; Piperno, 2006), one of the key crops of Maya societies.

The last globular morphotype is the globular echinate (Plate I, i–k). It is a spheroid shape covered with tips. This morphotype, widely observed in the literature, is generally associated with Arecaceae (Tomlinson, 1961; Piperno, 1988; Kealhofer and Piperno, 1998; Runge, 1999; Dickau et al., 2013; Watling et al., 2016). However, the production of this morphotype depends on the subfamily (Thomas, 2011).

3.3.3. Hat-shapes

This hat-shape morphotype (Plate I, l) is a semi-spherical shape crowned by one and several thorns. It is relatively small in size: less than 25 μm (Piperno, 1988, 2006; Kealhofer and Piperno, 1998; Dickau et al., 2013; Watling and Iriarte, 2013; Watling et al., 2016). It is generally associated with Arecaceae but is more representative of certain subfamilies, such as Arecoideae (Thomas, 2011).

3.3.4. Grass short-cell phytolith (GSCP) shapes (Plate I, m–aa)

The grass short-cell phytoliths (GSCPs) are divided into three main morphotypes: the lobate, saddle and rondel shapes. These three classes of phytoliths represent a great diversity of shapes and can be divided into numerous sub-variants (Mulholland, 1989; Piperno and Pearsall, 1998; Barboni and Bremond, 2009; Novello et al., 2012; Neumann et al., 2017). Barboni and Bremond (2009) suggest that the multiplication of sub-variants reduces the effects of taxonomic redundancy within the subfamilies of Poaceae. However, other researchers claim that the development of a complex classification system, with characters that are not objective and therefore difficult to reproduce from one author to another, has led to an increase in the various forms and thus to errors in the interpretation of assemblages (Rovner, 1971; Neumann et al., 2017). In our study, we chose to use this last approach to GSCP classification to build our base (Barboni and Bremond, 2009; Neumann et al., 2017).

Lobate shapes are mainly produced by Panicoideae (Twiss, 1992; Piperno and Pearsall, 1998; Piperno, 2006). There are three main variants: bilobate (Plate I, m–p), cross (Plate I, q–s) and polylobate (Plate I, u–v) shapes. The classification proposed by Neumann et al. (2017) classifies bilobate and cross shapes according to particle size and shank length. This is particularly important in our study, as it has been shown that the size of crosses could be an indicator of domesticated *Zea mays* (Prat, 1948; Pearsall and Piperno, 1990; Iriarte, 2003). Polylobate shapes (Plate I, u–v) and other rare shapes of lobate (e.g. triangle cross, Plate I, t) are not subdivided into variants.

Saddle-shaped GSCPs are produced by Chloridoideae (Barboni and Bremond, 2009; Garnier et al., 2013). Because Neumann et al. (2017) point out that the different shapes of saddles can't be assigned to taxonomic classification, we chose to view saddles (Plate I, w–x) as a single class of GSCP.

The rondel morphotypes (Plate I, y–aa) show relatively large morphological variation (Mulholland, 1989; Novello et al., 2012), but are not characteristic of a Poaceae subfamily (Barboni and Bremond, 2009; Neumann et al., 2017). Thus, in our classification, rondel shapes are classified into one morphotype, except for two particular shapes (Plate I, y–z). Pearsall et al. (2003) identified a rondel shape recognizable by a top with three spaced ridges (Plate I, aa) that is both corn and teosinte specific in the Maya zone. Given the importance of maize to Maya societies, we decided to keep apart this morphotype.

3.3.5. Papillae shapes (Plate I, ab–ag)

Papillae phytolith morphotypes are associated with Cyperaceae (Ollendorf, 1992; Runge, 1999; Thorn, 2004; Lu et al., 2006; Honaine et al., 2009; Neumann et al., 2009; Garnier et al., 2013; Novello et al., 2018). From our observations, most papillae morphotypes have a swelling that is angular or rounded, relatively large, and generally in the

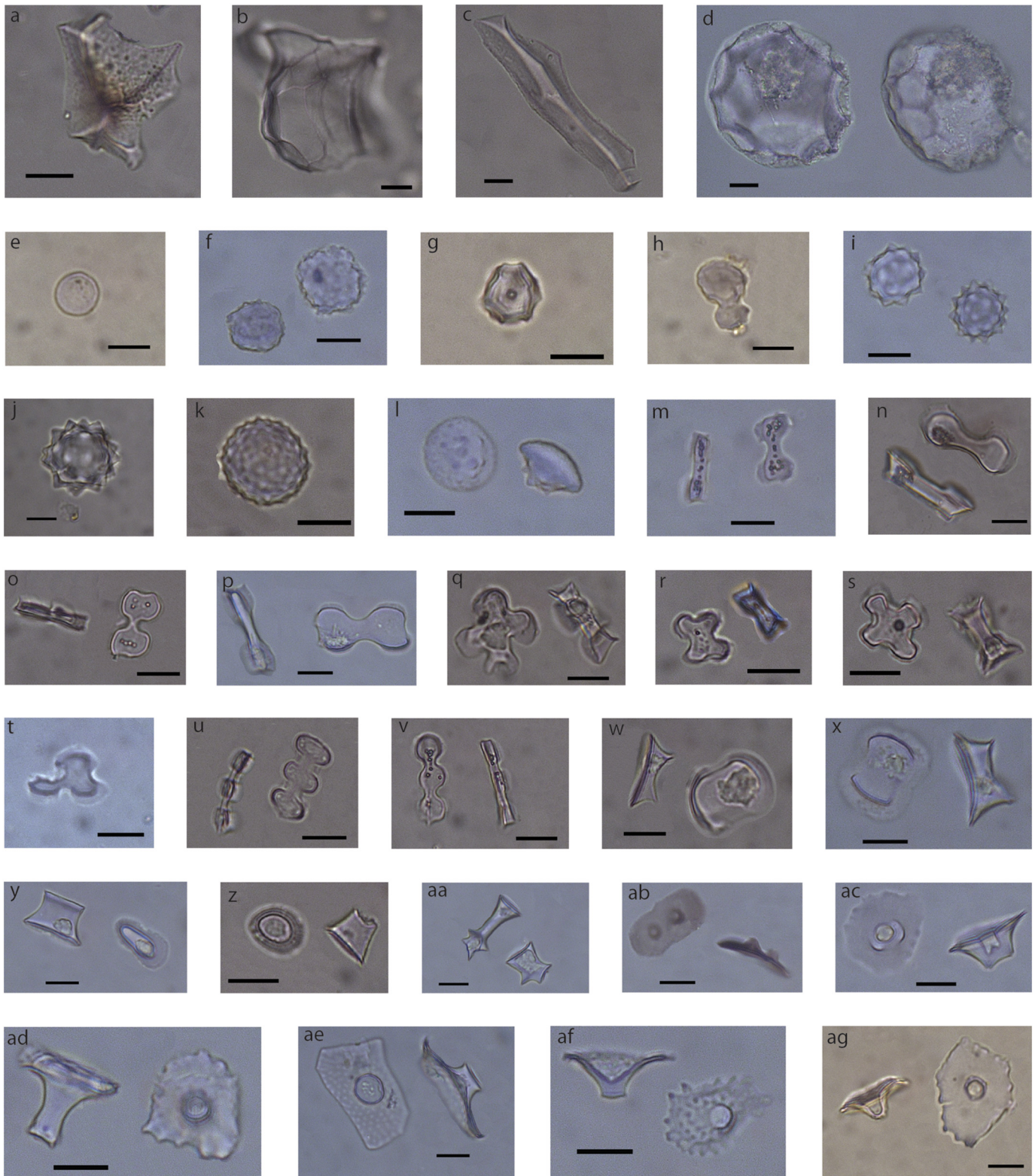


Plate I. Main morphotypes of diagnostic phytoliths: a–c: scleroid, d: globular faceted, e: globular psilate, f–g: globular decorate, h: globular composed, i–k: globular echinate, l: hat-shape, m–p: bilobate, q–s: cross, t: triangle cross, u–v: polylobate, w–x: saddle, y–z: rondel, aa: rondel crested, ab: papillae multiple, ac: papillae smooth, ad: papillae long, ae: papillae polygonal, af: papillae collumelate, ag: papillae wavy. (color) scale bar = 10µm

center of the shape. This lump appeared hollow on all morphotypes observed. Studies have shown that, currently, it is not possible to discuss its taxonomic assignment more precisely (Ollendorf, 1992; Honaine et al., 2009). Nevertheless, each variant of papillae morphotype has

been retained in our classification. The distinctive characteristics of these variants are the general shape of the plate, its texture, the ornamentation of the margins, and finally the size and structure of the luminous core.

3.3.6. Non-diagnostic shapes and other bioindicators (Plate II)

Some phytolith morphotypes are considered not diagnostic such as bulliform cells and elongate shapes. Bulliform cells are produced in the epidermis of plant leaves, from both monocots and dicots (Piperno, 2006). They are rather large morphotypes, generally $>20\ \mu\text{m}$, with various morphologies. In our study, we identified three bulliform shapes: cuneiform (Plate II, a–b), smooth parallelepiped (Plate II, c–d) and ornamented parallelepiped (Plate II, e–f). Although they do not have a taxonomic role, these shapes can nevertheless provide information on the ecological parameters of the deposition site, and the availability of water for certain plants in particular (Bremond et al., 2004). The second non-diagnostic phytolith family is that of the elongate morphotypes (Plate II, g–k). They are produced both in the tissues of herbaceous plants (Twiss et al., 1969; Lu and Liu, 2003) and dicotyledons (Piperno, 1988; Runge, 1999). Two subtypes can be discerned: elongate smooth shapes and elongate decorated shapes.

Finally, in our non-diagnostic counts, we included sponge spicules and diatoms (Plate II, l–s). These non-phytoliths siliceous forms are associated with water environments and can provide information about wetlands.

3.3.7. Use of phytolith indices

The D/P index was developed to describe the density of tree cover (Alexandre et al., 1997). It is calculated as a ratio of globular shapes associated with dicotyledons to GSCPs (Alexandre et al., 1997; Barboni et al., 1999; Bremond et al., 2004). Until now, this index has been little used in American tropical environments (Dickau et al., 2013). In this study, we tested its effectiveness in neotropical zones.

3.4. Statistical analysis

The statistical analysis in this study aims to attest our observations in the field, as well as the results from counting the phytolith assemblages. The statistical analysis of the quadrats, which had been grouped according to the main types of plant community, was carried out in two stages. The vegetation quadrat groupings were tested by a dissimilarity analysis using HAC (Hierarchical Agglomerative Clustering) clusters. It allows verifying whether quadrat groupings in ecosystems are represented by at least one similarity index, to identify poorly defined quadrats and ultimately to justify our groupings in the following factor analysis. The second step in the statistical analysis of modern vegetation

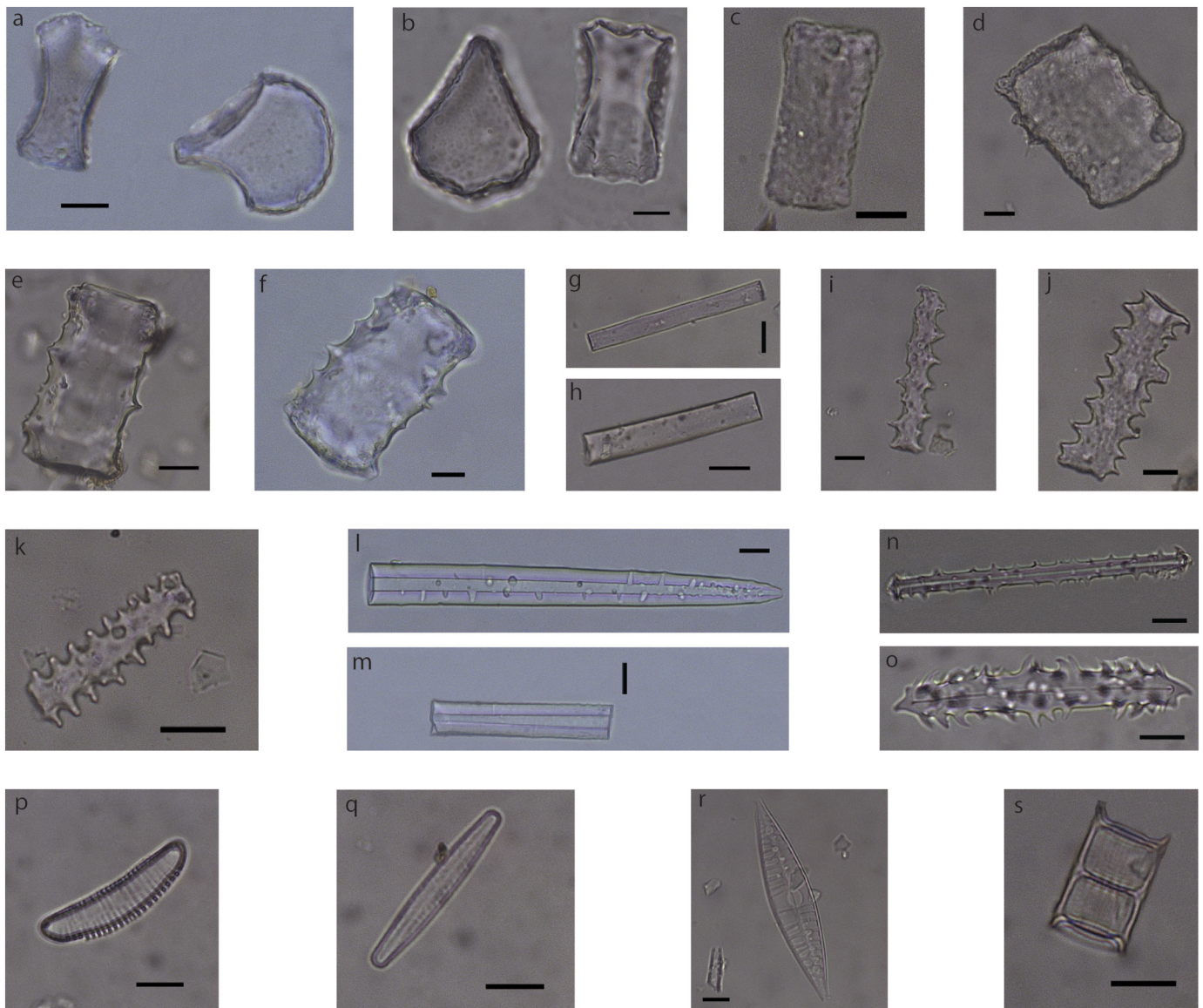


Plate II. Main morphotypes of non-diagnostic phytoliths. a–b: bulliform cuneiform, c–d: bulliform psilate, e–f: bulliform decarate, g–h: elongate psilate, i–k: elongate decarate, l–o: sponge spicules, p–s: diatoms. (color) scale bar = $10\ \mu\text{m}$

environments is a component analysis. This method allowed to assign groups based on the data matrix and identify the main characteristics that contribute to this graphical morphology: namely, plant taxa. A component analysis was performed on the quadrat/phytolith data matrices. By using the plant groups identified by the HAC the scatter plot obtained by analyzing the phytoliths was compared with the analysis of the current plant communities, and at the same time, the coherence between modern plant communities and phytolith assemblages was tested.

4. Results

4.1. Botanical study: Plant communities at the Naachtun site

The study of plant communities along the four transects from the bajos at low altitudes to the hills identified six major types of plant communities (Figs. 2 and 3). These field observations were tested by the use of a correspondence analysis.

4.1.1. The Sival zone (Plate III, f)

Today, almost the entire Naachtun site is covered by forest. The only exception is the Sival zone, located in the northern bajo, which is characteristic of a wet savannah composed of *zakaton* (*Phragmites australis*) and *tul* (*Cyperus articulatus*). The wet nature of the Sival is supported by the presence of *lechuga* (*Pistia stratiotes*). On the edge of the water area, an association of *yerba buena* (*Mentha x piperita*) and *zarza* (*Mimosa pigra*) was observed. Wild squash, *calabaza de raccoon* (*Cucurbita radicans*), was also observed at the edge of the Sival zone along transect T3. This association on the edge of a Sival zone had already been observed in Naachtun's northern bajo by Lundell in 1937 and was also reported by Martínez and Galindo-Leal in the Calakmul area in 2002 under the name *savana humeda*.

4.1.2. The Tintal zone (Plate III, e)

The Sival areas are bordered by a low forest dominated almost entirely by the *tinto* (*Haematoxylum campechianum*), a small knotty tree, cracked bark, with thorny branches and small leaves. These anatomical characteristics correspond to the usual adaptations of xerophytic vegetation in areas with high desiccation and strong sunlight. The name of this area, *Tintal*, can be explained by the predominance of this tree species. There is also a small *Tintal* zone in the southern bajo (quadrat S35, transect T4, Fig. 3). This type of environment has been recorded throughout northern Petén and appears characteristic of bajo areas bordering *aguadas* (wetland) (Lundell, 1937; Schultze and Whitacre, 1999; Martínez and Galindo-Leal, 2012).

4.1.3. The Chechemical zone (Plate III, d)

Further away from the Sival zone, the concentration of *tinto* decreases and is replaced by associations of shrubs belonging to the Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae and Myrtaceae families, such as *chechem negro* (*Metopium brownei*), *subin*, *katsin* and *jiesmo* (*Acacia* sp.), *cascarillo* (*Croton* sp.) and *guayavillo* (*Eugenia* sp.). The Chechemical zones, being those furthest from the water areas, contain some palm species, such as *cambray* (*Chamaedorea seifrizii*) and *escobo* (*Cryosophila stauracantha*). The herbaceous stratum is poorly represented, with some sparse *zakate I* (*Olyra latifolia*), *zakate II* (*Kyllinga pumila*), *zakate III* (*Cyperus ochraceus*) and *zakate de huecht* (*Rhynchospora cephalotes*). Plant species are widely dispersed in Chechemical environments, and their relative proportions may vary depending on the geographical area studied. Lundell (1937) does not seem to consider this plant community to be a bajo environment, but rather an area of secondary regrowth. Martínez and Galindo-Leal (2012) found the same association in the Calakmul region and named it *bajo mixto*. Tikal, Schultze and Whitacre (1999) considered these species associations to be a swamp forest environment distinct from the *Tintal* forest. We chose to name this environment *Chechemical* due to

the presence of a particular tree, the *chechem negro* (*Metopium Brownei*).

4.1.4. The Escobal zone (Plate III, c)

The northern slopes of the bajo and the eastern slopes of the southern bajo are covered by dense forest, higher than the bajo forests, and dominated by palm trees of the *escobo* (*Cryosophila stauracantha*) variety. Those are secondary species habitually growing in the higher areas of the site as well as Chechemical zones. Herbaceous plants are rare: *zakate* (*Olyra latifolia*) was observed only rarely. These dense palm forests are interpreted as the transition forests in the literature and referred to *Escobal* by Lundell (1937). They are found on the non-flooded slopes of transects T1, T3, and T4, and on the margins of the bajo zone along T2 (Figs. 2 and 3).

4.1.5. The Ramonal/Zapotal zone (Plate III, a)

The main vegetation on the archeological site and hilly areas is a high forest dominated by trees up to 40 m high belonging to the Sapotaceae, Sapindaceae, Myrtaceae and Moraceae. The most representative trees of this forest are the *ramon* (*Brosimum alicastrum*) and the *chicozapote* (*Manilkara zapota*). It can explain why two types of high forests were identified by Lundell (1937) and Schultze and Whitacre (1999): the *Ramonal* and *Zapotal* high forests. The *Ramonal* areas are characterized by a large population of *ramon* and an undergrowth rich in populations of *xate* (*Chamaedorea* sp.) and *cordoncillo* (*Piper* sp.). The forests of *Zapotal* are rich in Sapotaceae species and have relatively low palm undergrowth. In 1938, Lundell proposed that the domination of these resource-producing trees over the site areas should be inherited from old maintained gardens. In this study, we consider these forest communities as a single forest named here *Ramonal/Zapotal* area. In these forest environments, herbaceous plants are rare: only *zakate* (*Olyra latifolia*) is occasionally found.

4.1.6. The Carrizal zone (Plate III, b)

Locally, we observed some open patches in the *Ramonal/Zapotal* zone (T1 and T4) characterized by dense herbaceous thickets, which we refer to as *Carrizal* zones. Observed by Lundell in Naachtun in 1937, they consist of juvenile bamboos called *carrizo* (*Rhizodocladum bartlettii*). Concentrations of grass are relatively rare at the Naachtun site, meaning that the *Carrizal* zone can be considered one of its typical plant associations. *Carrizal* areas do not appear to be particularly associated with topographical or edaphic conditions, or archeological structures.

4.2. Statistical tests of plant communities

We first used hierarchical cluster analysis to assess the validity of grouping the environments into six ecosystems (Fig. 4). The HAC checks, in the form of a cluster, whether a hierarchy index finds initial groupings. In our case, the Euclidean hierarchy index was the most consistent. Nonetheless, five samples (S01, S02, S16, S22, and S24) do not correspond to our initial classification. With this HAC, S22 was interpreted as *Escobal* vegetation, while S24 was interpreted by the analysis as *Chechemical* vegetation. The three other quadrats clearly contained transitional vegetation and are defined as such in our statistical analysis.

The first two axes of the component analysis (CA) of all quadrats explain 25.0% of the total variance (Fig. 5a). The contribution tables of Fig. 5 show the species that contributed most to the morphology of the scatter plot and that are considered as ecological indicators. Axis 1 (14.6% of the variance) distinguishes open habitat quadrats with *Sival* species, located at the positive end, from forest quadrats, located at the negative end. Axis 2 (10.4% of the variance) distinguishes plant communities according to the main altitude ranges. Samples and species typical of bajo forests are located at the positive end, while forest samples from the archeological site, more upper, are grouped at the

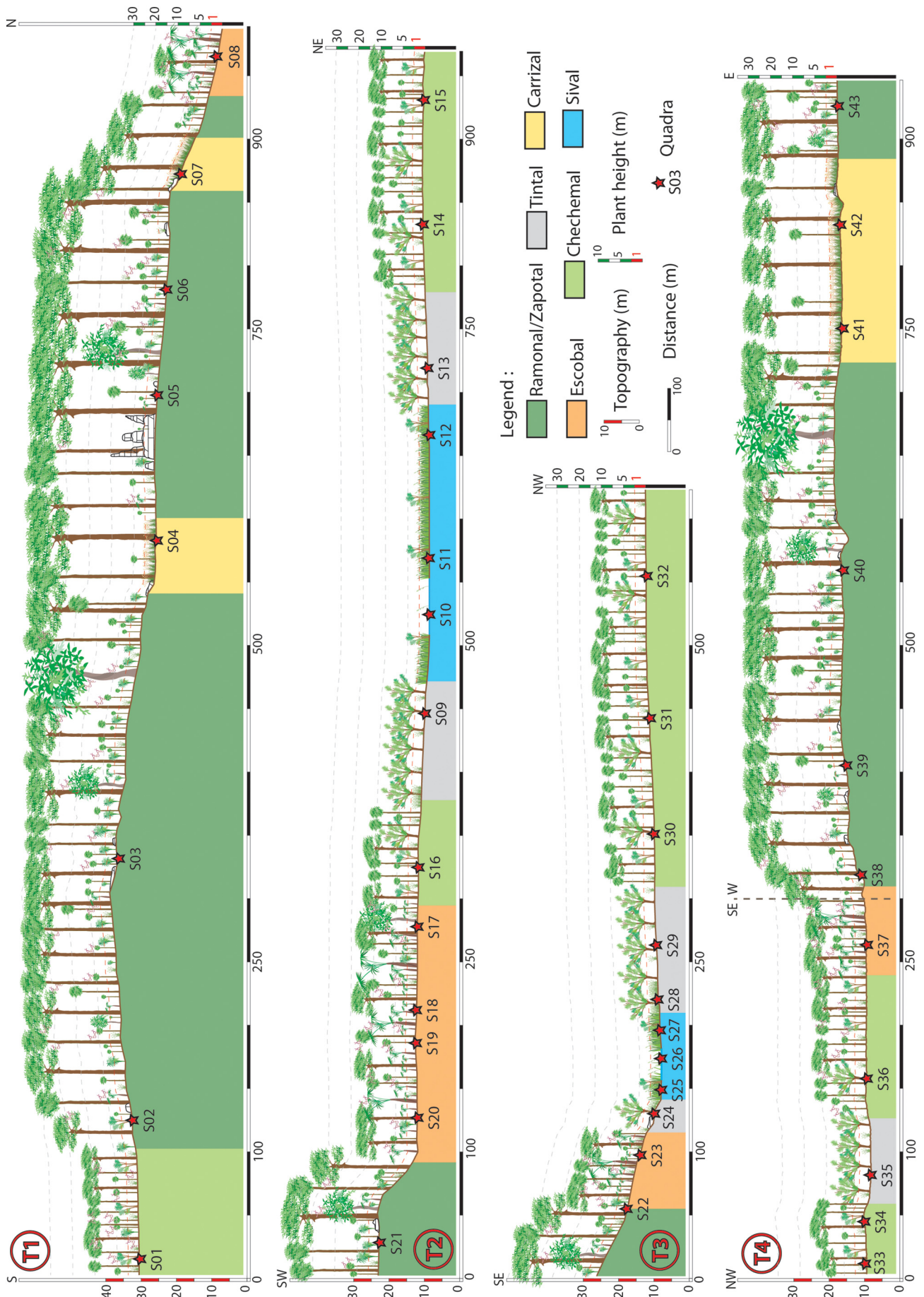


Fig. 3. Ecological transects with plant communities, elevations and quadrat locations. (color)



Plate III. Plant communities of the Naachtun territory. a: Ramonal/Zapotal, b: Carrizal, c: Escobal, d: Chechemal, e: Tintal, f: Sival. (color)

negative end. Two irregularities were identified within this first CA. Quadrat S24 is interpreted to be a relatively open zone in the *bajo*, whereas it is a forest zone disturbed by a compacted path at the edge of a Sival zone. This observation leads us to conclude that this sample is problematic. The second problem is that the scatter plot corresponding to the hill vegetation environments is too condensed to discriminate the quadrats. Thus, to refine our classification, we chose to perform a second CA on these samples (Fig. 5b).

For the second CA, the first three axes explain 35% of the variance. The CA conducted on the first two axes (Fig. 5b) shows that Axis 2, which explains 11.1%, is not decisive in the distribution of samples and species. Axis 1 (15.3% of the variance) distinguishes the quadrats associated with the *bajo* areas located at its negative end from the hill and site quadrats at its positive end. Axis 3 (9.4% of the variance; Fig. 5c)

distinguishes the forest areas of hills with samples of the *Ramonal/Zapotal* zones at its negative end, and samples of *Carrizal* environments at its positive end.

These conclusive statistical analyses demonstrate that our sampling and botanical survey method is statistically reliable, except for the identified plant transition zones. Thus, this classification of plant communities can be used to characterize modern phytolith assemblages.

4.3. Modern phytolith assemblages (Fig. 6 and Fig. 7)

The phytoliths counts from each quadrat have been summarized in Figs. 6 and 7. The distribution diagram (Fig. 6) shows the relative abundances of phytolith morphotypes by quadrat, grouped into plant communities. The first part of the diagram concerns the relative

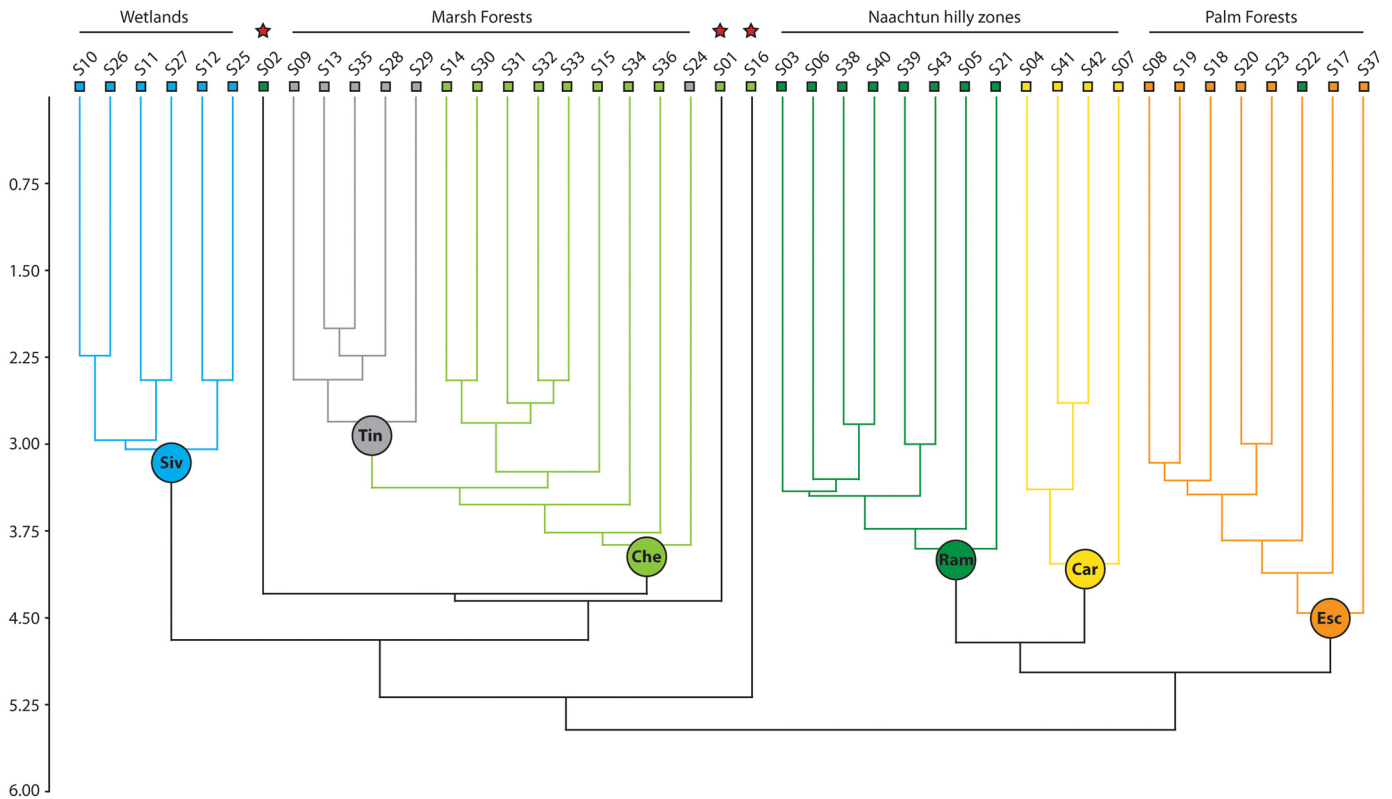


Fig. 4. HAC of plant communities in relation to quadrat species assemblages: Siv = Sival, Tin = Tintal, Che = Chechemical, Ram = Ramonal/Zapotal, Car = Carrizal, Esc = Escobal. (color)

abundances of diagnostic morphotypes. They are expressed as a percentage of the total number of diagnostic morphotypes. The second part of the diagram concerns the abundance of non-diagnostic phytoliths and bioindicators. They are expressed as a percentage of the total number of counted particles. The diagram of the descriptive statistics for the morphotypes (Fig. 7) shows the amplitude of the distribution of morphotype classes across the six types of plant communities. This second diagram completes the relative abundances diagram. On these diagrams, quadrats that were not discriminated by the HAC (Fig. 4; S1, S2, and S16) were not included in the calculations in Fig. 7.

Sival: Six samples are assigned to this environment (S10, S11, S12, S25, S26, and S27). The phytolith assemblages are dominated by globular mixed, GSCP (especially saddle and rondel) and papillae morphotypes. On average, papillae morphotypes represent 35% of *Sival* assemblages, reaching up to 85% in S10. Globular mixed, saddle and rondel phytoliths represent on average 15% of *Sival* assemblages but could account for over 30% (Fig. 6). The D/P index accounts systematically less than 1. For bioindicators, *Sival* environments record the highest average proportion of sponge spicules (30%) and diatoms (6%) of all assemblages. Analysis of the relative abundance diagram points to differences between the assemblages in forest environments (*Ramonal*, *Carrizal*, *Escobal*, *Chechemical*, and *Tintal*) and wet/open environments (*Sival*; Fig. 6).

Tintal: Four samples are assigned to this environment (S9, S13, S28, and S35). The phytolith assemblages are dominated by globular mixed, GSCP (lobate) and papillae morphotypes. On average, globular mixed morphotypes represent 37% of *Sival* assemblages, reaching up to 50% in S9 and S28 (Figs. 6 and 7). Lobate and papillae morphotypes each account for on average 21% of *Tintal* assemblages (Fig. 7). The D/P index oscillates between values close to 1. The proportions of bioindicators are close to those observed in the *Sival*, with an average of 28% for sponge spicules and 3% for diatoms.

Chechemical: Seven samples are assigned to this environment (S15, S24, S31, S32, S33, S34, and S36). The main feature is the high percentage of globular mixed shapes, accounting for on average 80% of

assemblages but reaching up to 87% (S31 and S36; Figs. 6 and 7). Accordingly, the D/P index values are high (15–20). As regards bioindicators, diatoms are absent, while sponge spicules account for on average 8%.

Escobal: Eight samples are assigned to this environment (S9, S17, S18, S19, S20, S22, S23, and S37). Globular mixed (50%) and globular echinate (40%) phytoliths are predominant (Fig. 7). The D/P values are also very high, at 27 on average. The proportions of sponge spicules and diatoms in these assemblages are very low (less than 1% in average).

Carrizal: Four samples are assigned to this environment (S04, S07, S41, and S42). The phytolith assemblages are dominated by globular mixed morphotypes, exceeding 60%. The most conspicuous feature is the high percentage of rondel GSCPs, accounting for 26%, and the rondel crested morphotype, reaching values around 20% (Fig. 7). The non-diagnostic phytoliths, bulliform parallelepiped and elongate psilate morphotypes are particularly well represented in these samples (Fig. 6). The D/P values are low for a forest environment, recording 3 on average. Sponge spicules and diatoms are absent.

Ramonal/Zapotal: Eight samples are assigned to this environment (S3, S5, S6, S21, S38, S39, S40, and S43). Globular mixed and hat-shape morphotypes dominate these assemblages, representing 65% and 18% respectively. The D/P index is extremely high, with 38 on average. Sponge spicules and diatoms are absent.

4.4. Statistical tests of phytolith assemblages

The assembly groups defined based on the distribution diagram and ecosystems were tested by a component analysis. The variables were the phytolith morphotypes and quadrat samples. The contribution table of Fig. 8 indicates the morphotypes that contribute most to the morphology of the scatter plot. Axis 1 and Axis 2 explain 52.7% of the variance (Fig. 8a). Axis 1, which explains 36.3% of the total variance, distinguishes between the openness and/or humidity of the environments: the *Sival* and *Tintal* environments are located at the positive end and are

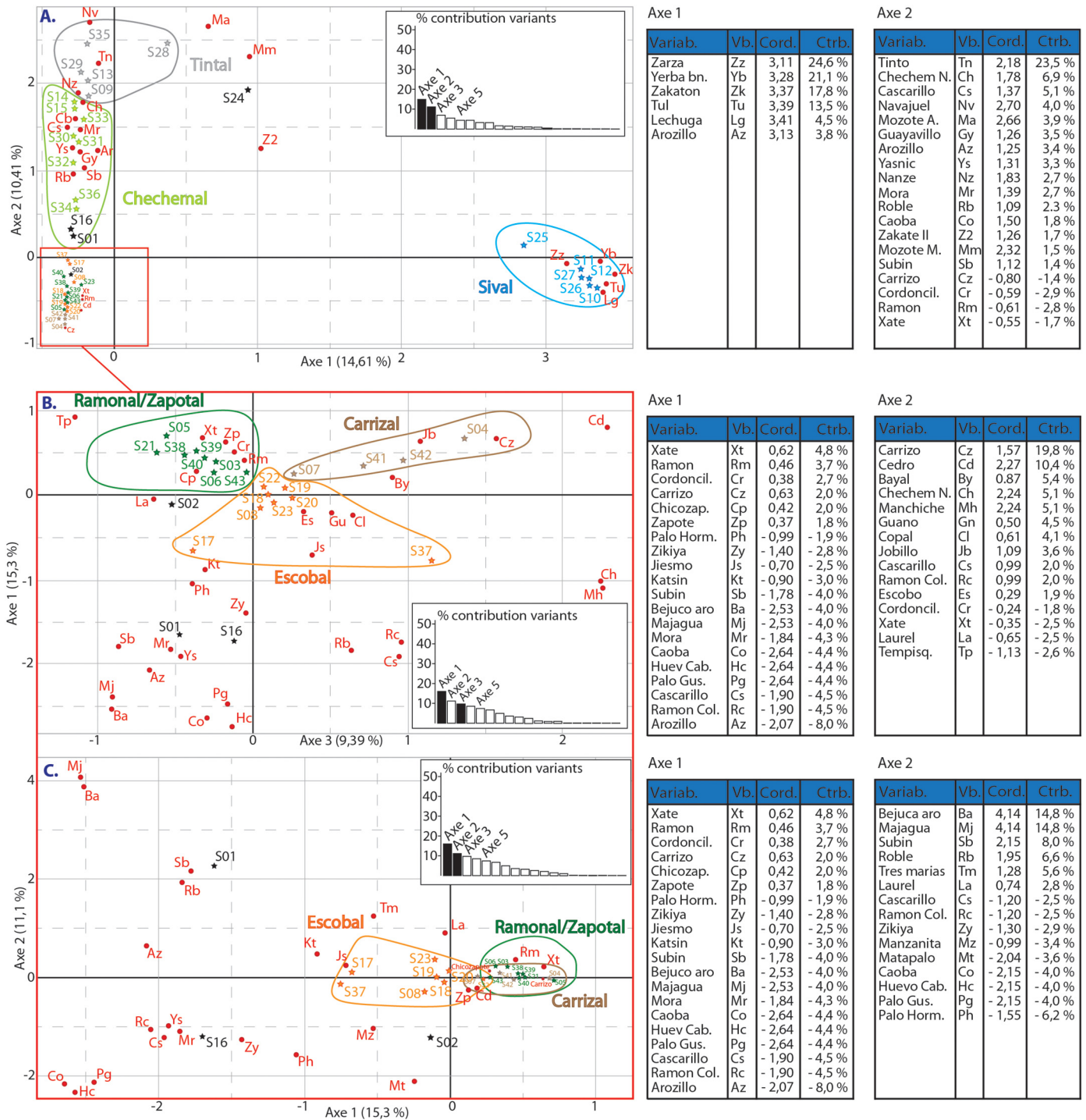


Fig. 5. CA relating to data on the presence of plant species; the plant communities are selected based on HAC. (color)

mainly influenced by sponge spicules, diatoms, and papillae morphotypes. GSCPs are also present at the positive end. The negative side includes the samples taken from forest areas and morphotypes such as globular mixed and globular echinate.

Axis 2 of our analysis explains 16.43% of the total variance and differentiates grassy undergrowth forests from forest areas with trees only. The variables on the positive side of this axis that contribute most to the morphology of the scatter plot are the rondel crested GSCP, bulliform cells and elongate morphotypes. However, the samples from *Ramonal*, *Escobal*, and *Chechemical* forest areas form a group of samples that are difficult to analyze. This highlights the necessity of isolating the *Carrizal* areas from the other forest areas on the site and in the *bajo*.

A second CA (Fig. 8b–c) was needed to distinguish the different Naachtun forest samples (*Chechemical*, *Ramonal/Zapotal*, *Escobal*). The first three axes explained 73.5% of the total variance. In the second graph (Fig. 8b), Axis 1 (29.2% of the variance) and Axis 2 (23.4% of the variance) help to distinguish between the site's different forest ecosystems. The sponge spicules variable contributes considerably to the morphology of the scatter plot for these two axes, and the *Chechemical* samples are therefore located in the upper right corner of the graph and isolated from the other samples. The second contributing variable for both axes is the globular echinate morphotype, which is located on the negative part of Axis 1 and the positive part of Axis 2. This morphotype allows to differentiate between the different *Escobal*-type

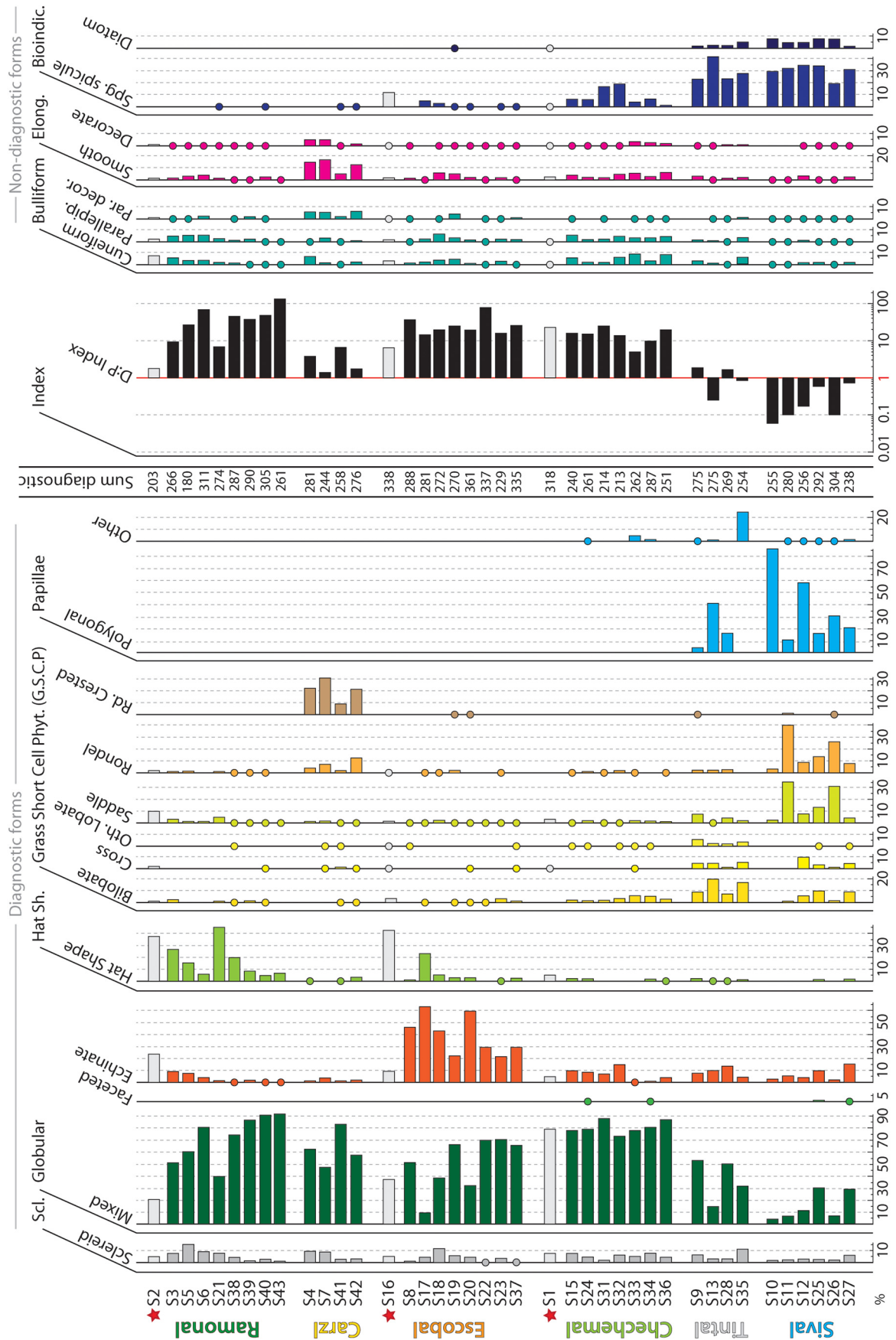


Fig. 6. Distribution diagram of phytolith morphotypes. (color)

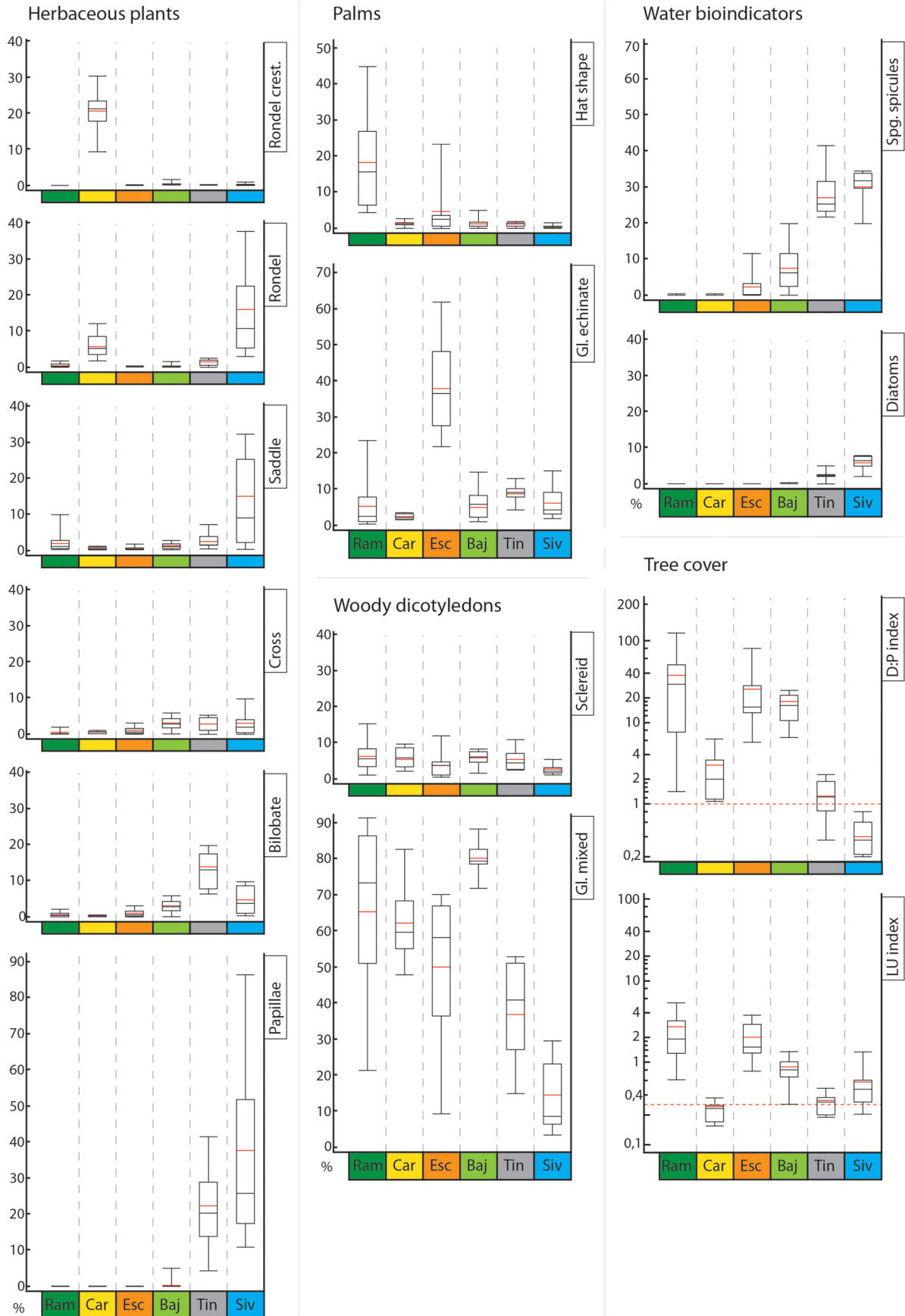


Fig. 7. Statistical distribution of morphotypes by the environments. (color)

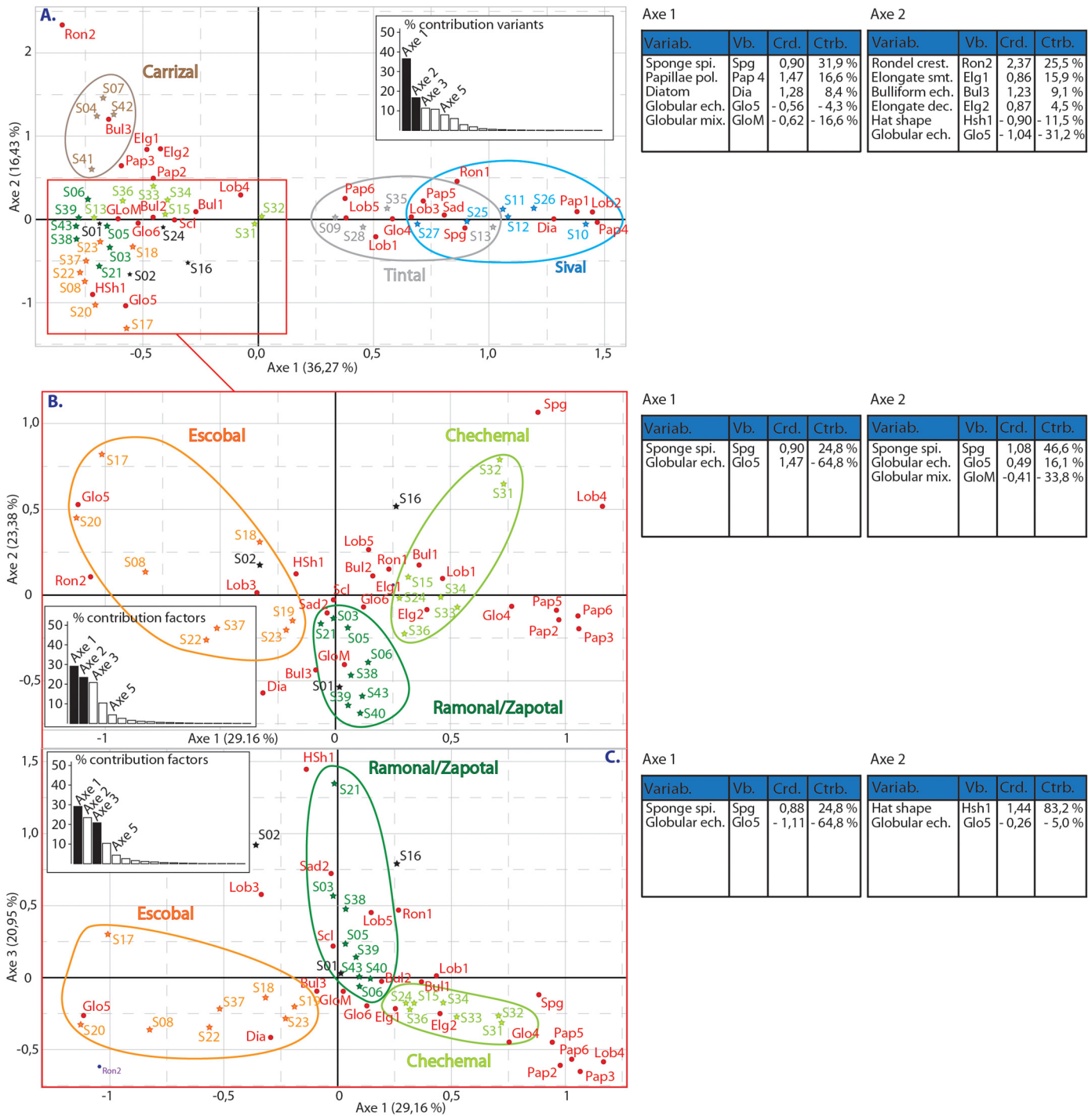


Fig. 8. CA relating to the phytolith distribution diagram. (color)

forests (Fig. 8b). Axis 3 in the second CA suggests that hat-shape morphotypes help to distinguish between the Ramonal/Zapotal samples (Fig. 8c). Finally, the vegetation samples interpreted as “undefined areas” by the HAC (S1, S2, and S16; Fig. 4), were not characterized by our component analysis either (Fig. 8).

5. Discussion

5.1. Definition and identification of Naachtun plant communities

The study and interpretation of phytolith assemblages show significant differences between plant formations. They point to the necessity

of applying the general approach, as well as taking into account not only non-diagnostic phytoliths but also other bioindicators during the interpretation process.

The phytolith assemblages in Sival zones can be explained by their plant associations. Papillae morphotypes are produced by Cyperaceae, the family to which *tul* (*Cyperus articulatus*) belongs (Novello et al., 2012; Watling and Iriarte, 2013), while saddle and rondel morphotypes are produced by certain subfamilies of Poaceae, such as Arundinoideae, to which *zakaton* (*Phragmites australis*) belongs (Ollendorf et al., 1988; Piperno and Pearsall, 1998; Liu et al., 2013). The high proportions of diatoms could indicate the presence of perennial water.

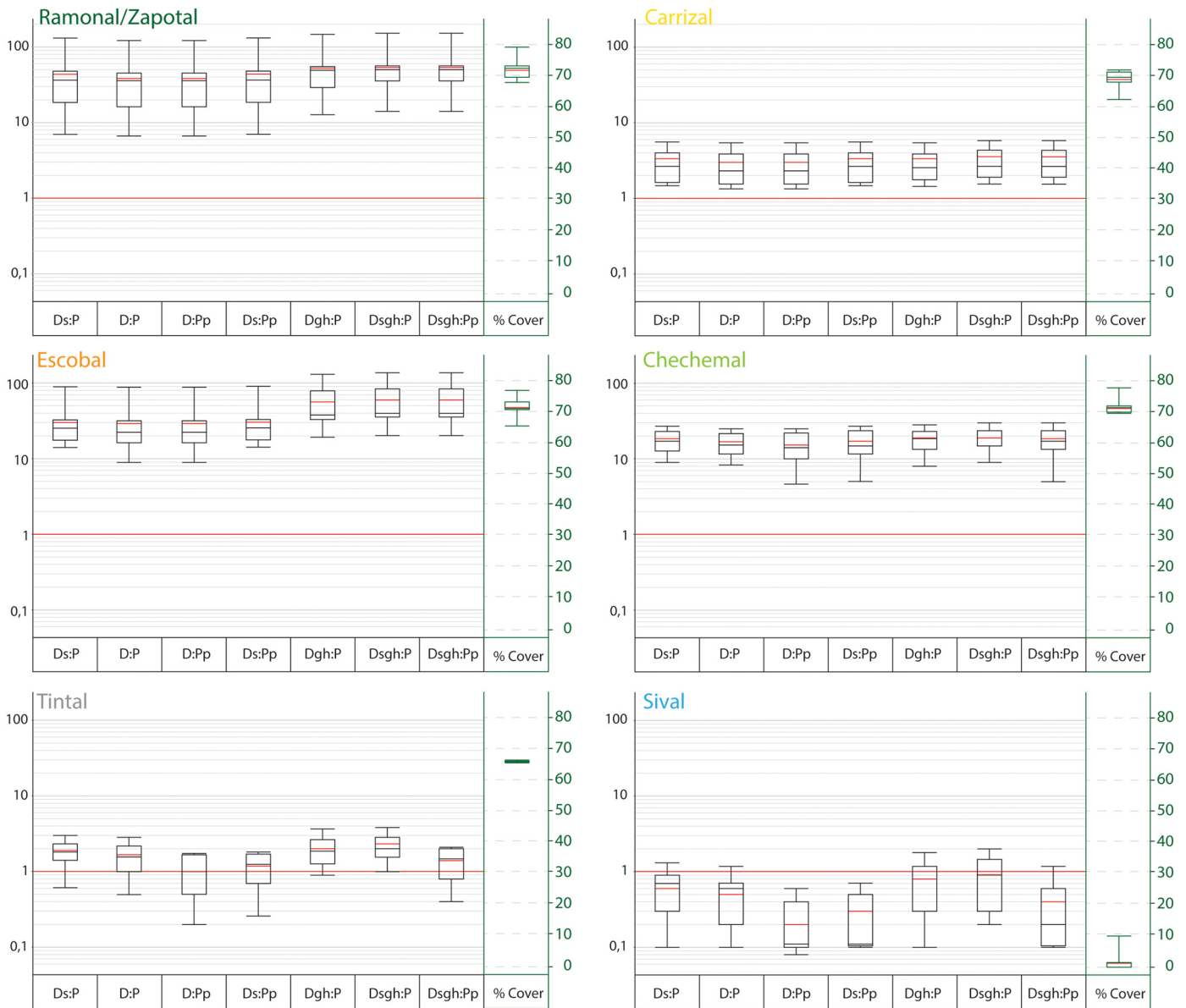


Fig. 9. Evolution of D/P values by environments and quadrats according to the D/P index formulas used (Table 2) and vegetation cover. (color)

The *Tintal* zones' assemblages were interpreted as assemblages of a transitional plant community between open and forest areas. The globular mixed phytoliths were most likely produced by *tinto* (*Haematoxylum campechianum*), which is the only woody dicotyledon in this plant community. The high proportions of papillae and bilobate morphotypes and other bioindicators can be explained by various processes. The *Sival* areas contained a much higher percentage of papillae morphotypes than in other studies (Barboni et al., 2007; Novello et al., 2012). The seasonal flooding of *Sival* areas may allow for the registration of Cyperaceae tissues and phytoliths, as well as diatoms and sponge spicules, in *Tintal* soils. Finally, the significant presence of bilobate morphotypes could be explained by the irregular presence of seasonal grassy undergrowth, consisting of Cyperaceae and Panicoideae, as was observed in 2017.

Chechemal forest assemblages can be partly explained by the rare occurrences of herbaceous species (Poaceae, Cyperaceae, etc.) or monocot trees, and by a predominance of the woody dicotyledons that produce globular mixed morphotypes. It is principally the presence of sponge spicules, due to seasonal flooding in these forest areas that permit these environments to be characterized.

The palm groves of the *Escobal* environments are characterized by a predominance of both globular echinate and globular mixed which morphotypes originating from the ligneous trees of the forest. The globular echinate morphotypes are produced by certain subfamilies of Areaceae, such as Coryphoideae (Thomas, 2011), which *escobo* (*Cryosophila stauracantha*), the dominant species in this palm grove community, belongs to. The presence of sponge spicules indicates that these areas are subjected to a seasonal flood.

The *Ramonal/Zapotal* high forests are defined by a phytolith association composed of globular mixed and hat-shape morphotypes. Globular mixed morphotypes are produced by the woody dicotyledons of the forest, while hat-shape morphotypes may have originated from *xate* (*Chamaedorea* sp.), the dominant species in this plant community. Indeed, Thomas, 2011 indicates that this morphotype is overrepresented in Arecoideae species, including the *Chamaedorea* genus. However, some samples (S6, S39, S40, and S43) contained lower proportions of hat-shape morphotypes (Fig. 6). This can be explained by the fact that the *Zapotal* plant association, described by Lundell (1937) and Schultze and Whitacre (1999), have undergrowth with lower *xate* content. This type of assemblage could, therefore, be confused with those in the

upper areas of a *bajo* that do not contain sponge spicules (S01). Within the high forest vegetation, areas with bamboo thickets (*Carrizal*) were identified by an association of globular mixed, rondel crested, bulliform decorate and elongate smooth morphotypes. The fact that the undergrowth is dominated by *Rhipidocladum bartleddii* suggests that this bamboo species produce some of the morphotypes in this association. The discovery of similar rondel morphotypes in other bamboos (rondel three-pikes, Pearsall et al., 2003) may confirm this hypothesis.

To conclude, three levels of interpretation of the assemblages can be highlighted. (1) The first level concerns the differentiation between forest and open areas. High proportions of GSCPs and papillae shapes indicate open environments, while high proportions of globular mixed morphotypes, which may or may not be accompanied by palm tree morphotypes (globular echinate and hat-shape), are representative of forest environments. Forest zones with grassy undergrowth or “savannahs” are characterized by high proportions of globular mixed morphotypes and one or more morphotypes of GSCP or papillae, as in the case of the *Carrizal* and *Tintal* environments. (2) The second level of identification concerns the wet character of the vegetation. The presence of high proportions of papillae shapes (>15%) in the assemblages indicates wet plant associations. As regards bioindicators, the presence of diatoms is associated with perennial water bodies, while sponge spicules suggest the presence of occasional or seasonal water bodies in the *bajo* zone. This is useful to identify the forest areas located in the *bajo*'s influence zone during the wet season. (3) The last level of interpretation of the diagrams concerns the identification of forest areas at the edges of hills, slopes, and *bajos*. At Naachtun, the proportion of phytoliths produced by the *Arecaceae* seems to be useful in distinguishing the palm transition forests and the *Ramonal* forest from the hills of the site.

5.2. Discussion of the use of indices

5.2.1. Identify the cover layer

The first studies conducted using the D/P index represented the tree cover as a ratio of globular decorated, produced by woody dicotyledons, to GSCPs and morphotypes associated by some authors with *Poaceae* (Alexandre et al., 1997, 1999; Bremond et al., 2004, 2008). Changes in the classification of phytoliths prompted the authors to adapt this formula to the morphotypes and environments studied (Strömberg, 2004; Bremond et al., 2004; Barboni et al., 2007; Neumann et al., 2009; Garnier et al., 2013; Dickau et al., 2013). According to Alexandre et al. (1997), a D/P index > 1 is representative of open environments, while D/P values < 1 indicate forest areas.

Thus, for Naachtun plant environments, our results indicate that forest areas have high D/P values recording an average of 38 for *Ramonal/Zapotal* samples, 27 for *Escobal* samples and 16 for *Chechemal* samples. These values, higher than 1, are associated with dense vegetation areas, which is consistent with these forest environments. In the *Sival* samples without tree strata, the D/P index average was around 0.53, suggesting that the D/P index can be used to identify open environments. However, *Carrizal* areas, with grassy undergrowth, and *Tintal* areas, with seasonally grassy undergrowth, have D/P values higher than 1 but much lower than for forested areas. The average D/P index for *Carrizal* areas was 2.84, but varied between 1.1 and 6, while the index values for *Tintal* zones varied between 0.36 and 2.1 (Figs. 6, 9 and 10).

The D/P index does not seem suitable for identifying certain plant formations whose values overlap, such as those in the *Carrizal*, *Tintal*, and *Sival* zones. This is particularly true of the *Tintal* and *Sival* environments, which contain similar phytolith assemblages dominated by *Cyperaceae* and GSCPs. To overcome this obstacle to interpretation, we decided to adjust the D/P formula to our study by including certain useful morphotypes (*Cyperaceae*, sclereid, globular echinate and hat-shape).

Fig. 9 shows the variation in the D/P values for each quadrat studied and compares them with the vegetation cover values for seven different D/P index formulae. The seven formulae correspond to a variation in the sum and type of morphotypes applied to the numerator, denominator, or both simultaneously (Table 2).

The first observation leads to the conclusion that including globular echinate and hat-shape morphotypes in the formula maximizes D/P values, especially for *Sival* zones where the D/P average was 0.9. Thus, the use of these morphotypes in the D/P formula does not seem justified. Including sclereid morphotypes in the index calculation does not have a significant effect on D/P values. This can be explained by the low proportions of this morphotype in the assemblages. Including papillae morphotypes in the denominator of the index significantly reduces the index values for *Sival* (0.24 on average) and *Tintal* (0.98 on average) zones. If including papillae shapes minimize the values for *Tintal* zones, this highlights the opening of the *Sival* zones and therefore it seems necessary in our D/P index calculations. However, the simultaneous addition of sclereid morphotypes to the numerator and papillae morphotypes to the denominator increases the D/P values for *Tintal* zones (1.11 on average) while maintaining the best numerical representation of the *Sival* zones (0.29 on average). Thus, for the purposes of our study, and for geographical areas where papillae morphotypes make up a significant percentage of phytolith assemblages, we recommend to adjust the D/P index using the following formula:

Globular mixed + Sclereid/GSCP + Papillae

5.2.2. Identify the mixed zones

Even after adapting the D/P index to suit the particularities of our plant zones, it still does not seem possible to use the D/P index to identify mixed zones with grassy and woody layers. Indeed, our study shows that the D/P index for *Carrizal* and *Tintal* zones sometimes have the same values for *Sival* zone. It seems, therefore, necessary to develop a new index that allows these mixed zones, misinterpreted by the D/P index, to be clearly identified.

In this study, we propose a new index that defines a mixed zone characterized by a combination of woody trees and herbaceous plants as an addition D + P. This D + P assemblage must be matched with a tree D assembly and a grassy P assembly. We propose the following formula:

$$[(D + P)/P + (D + P)/D]/(D + P) \times 10$$

which can be reduced to the form

$$[(D + P)/(D * P)] \times 10$$

The calculation of this formula implies that the predominance of any one part of the assembly (D or P) over the other parts will tend to minimize the denominator and thus produce high values indicating strictly forest or strictly savannah areas. Whereas a mixed assembly (D = P) will produce D/P index values of around 1, but this new index will allow the presence of both a herbaceous zone and tree stratum to be confirmed. Indeed, in such a case, the average values of D and P will increase the denominator, which will cause the index values to fall to a minimum value.

This new index, named LU (limits/undergrowth) index, was developed for our samples and has good potential for ecological recovery in our environmental contexts (Fig. 10). The lowest values were obtained for environments containing both a herbaceous stratum and tree cover, such as the *Carrizal* and *Tintal* environments. These LU values put into perspective the average D/P index values of these environments and confirm their mixed nature. The *Sival* zones generated different LU index values depending on the sampling zone. The values for quadrats

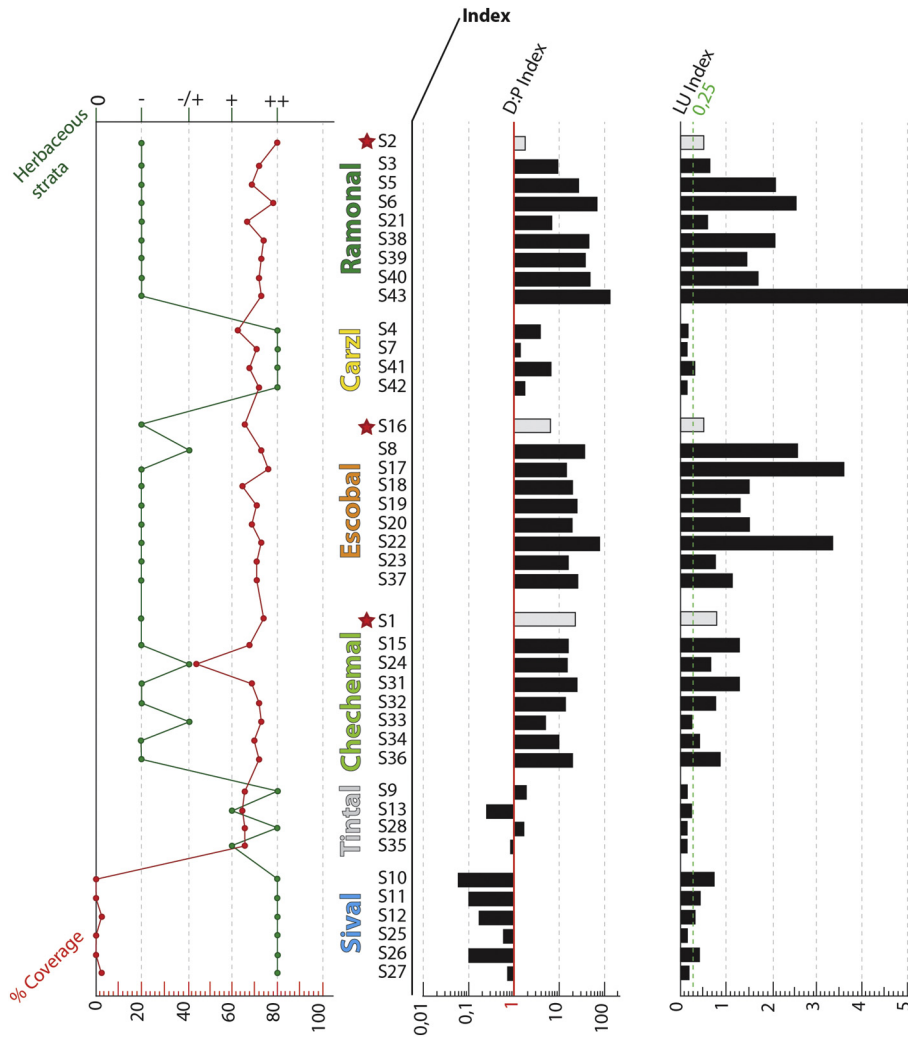


Fig. 10. Evolution of the LU index as a function of the D/P index, the vegetation cover rate and the relative frequency of a grassy undergrowth. (color)

S12, S25, and S27 were low and comparable to those of the *Carrizal* zones, which could be explained by the fact that the edges of the *Tintal* and *Ramonal* zones are located nearby. Conversely, the LU index values for the samples from the center of the *Sival* zone (S10, S11, and S26) were higher due to the distance from the wooded areas. The new index values calculated for the *Escobal* and *Ramonal* environments were relatively high and would indicate a sparse herbaceous stratum. This is in agreement with the high D/P index values. Finally, the

Chechemal environment quadrats had relatively low values compared to other forest areas. Some of the low values from the new index (for quadrats S33 and S34) could correspond to forest areas where the herbaceous stratum is only seasonally present, as observed in other *bajo* areas at Naachtun. Based on the quadrats and vegetation parameters (tree cover, herbaceous undergrowth), we can define 0.25 as the maximum LU index value identifying mixed and transitional vegetation areas.

5.3. Development of a paleoenvironmental tool for Maya archeology

One main objective of this study was to test the potential of phytolith assemblages in Petén for characterizing past landscapes and past ecosystems. The main hurdles to the development of a bioindicator tool are the different post-deposition taphonomic processes that can modify thanatocoenosis and thus the interpretation of assemblages (Madella and Lancelotti, 2012). These disturbance factors include the differential diagenetic recording of morphotypes (Piperno, 1988; Alexandre et al., 1997), the vertical translocation of assemblages (Runge, 1999; Fishkis et al., 2010) and lateral transport (Fredlund and Tieszen, 1994; Osterrieth et al., 2009; Madella and Lancelotti, 2012; Watling et al., 2016). Finally, factors making interpretation more difficult may also

Table 2

Different formulas used to calculate the D/P index.

Index	D:P formula
Ds:P	(globular mixed + sclereid)/(GSCP)
D:P	(globular mixed)/(GSCP)
D:Pp	(globular mixed)/(GSCP + papillae)
Ds:Pp	(globular mixed + sclereid)/(GSCP + papillae)
Dgh:P	(globular mixed + globular echinate + hat-shape)/(GSCP)
Dsgh:P	(globular mixed + sclereid + globular echinate + hat-shape)/(GSCP)
Dsgh:Pp	(globular mixed + sclereid + globular echinate + hat-shape)/(GSCP + papillae)

occur during the production and deposition of phytoliths, depending on the composition of plant communities and sediment types.

Initially, the analysis of fossil samples, and their paleoenvironmental interpretation must be carried out with the awareness that “time averaging” in Holocene sediment can easily represent from several years to tens or hundreds of years (Fredlund and Tieszen, 1994; Albert et al., 2006). For phytoliths records in fossil samples, it is difficult to know the period of the deposit. Thus, a phytolith record contains a mixture of consecutive plant associations at a location over an unknown number of years. However, this problem also exists for modern samples. The first centimeters of the A horizon sampled are not representative of the current vegetation, but rather of the vegetation from a recent period which is not precisely known and could cover several months to a few decades. The part of transect T3 from the *Sival* zone to the southeast of the northern *bajo* (S24–S27) is a good example. The vegetation within the *Sival* zone is organized into specific vegetation rings linked to the expansion of perennial water in spring: first the *tul/zakaton* association, then a halo of *tul* only, then a *tul/yerba buena/zarza* association. As observed during field missions, every spring, water availability is different, and this affects the plant composition of quadrats S24–S28. It can link with the spatial mobility of the *Sival* zone's plant rings depending on water precipitation. Because it is a continuous phenomenon continues, 2017 samplings in the eastern *Sival* zone may correspond to an average of phytolith records from the vegetation at different seasons. Thus, in *Sival* assemblages, the high proportions of papillae morphotypes represent the rings of *tul* (Cyperaceae), while high proportions of saddle shapes represent the rings of *zakaton* (Arundinoideae), and globular mixed and sclereid morphotypes indicate the rings of *zarza* (Fabaceae).

Phytolith assemblages can be affected by lateral transport effects, caused by wind, water, gravity or bioturbation (Fredlund and Tieszen, 1994; Alexandre et al., 1997; Barboni et al., 1999; Piperno, 2006). The systematic approach of ecological transect sampling allows to test the estimation of morphotype transport from one quadrat to another one. Alexandre et al. (1997) point out that high tropical forests' canopies limit wind transport. However, transport by water should be accounted for interpreting assemblages. At Naachtun, phytolith transport by water may be facilitated by the substantial drainage system from the high areas to the *bajo*, as well as the flooding period of the *bajo* during the wet season. Our results show that phytolith assemblages are not affected by transport and are most representative of the local vegetation. The vegetation of the seasonally flooded lowlands (*Sival*, *Tintal*) is dominated by papillae polygonal and diatoms, while globular mixed morphotypes are relatively few and mainly restricted to upper woody dicot areas. The same observation can be made for the slope area samples. The drainage of high zones does not result in the mixing of phytolith associations. For example, phytolith assemblages in the transition area from S7 to S8 on transect T1 are not subject to contamination from rondel crested morphotypes. Moreover, looking at the sloped area running along transect T3 (S22–S26), the upper samples, which are rich in globular mixed morphotypes, have little influence on the D/P index value for the *bajo* samples. Thus, for the current Naachtun site, phytolith transport plays a minor role in the alteration of phytolith assemblages.

Transport does not affect the identification of plant landscapes. However, the transport of phytoliths may play a role in the taxonomic representativeness of the quadrats studied. In all the plant communities studied, palm phytoliths were observed in an average of around 5–10% of the phytolith associations. In environments such as *Tintal* or *Sival* zones where *Arecaceae* are absent, these high proportions of palm phytoliths raise questions over their transport. The high numbers of phytoliths produced by the *Arecaceae* and their greater resistance to erosion (Chabot et al., 2018) could mean that they have a ubiquitous record. We surmise that comparable proportions (5–10%) of *Arecaceae* phytoliths in fossil samples can be interpreted as the result of

contamination caused by transport, rather than as an identifying ecological signal.

6. Conclusion and future researches

This work has allowed for the development of a tool to study paleoenvironments in the Maya zone. Phytoliths are particularly useful in tropical forest areas where other types of fossil conservation can be lacking. The analysis of modern soil samples from Naachtun has shown the potential of phytolith assemblages as bioindicators of plant landscapes in the Maya zone. A robust interpretation of phytolith assemblages has been enabled both by sampling the modern soil and studying the modern plant communities' distribution. We used a general approach to interpret phytolith assemblages diagrams and multivariate statistical analyses, as well as an index approach. These results testify of the possibility to distinguish wet and open *Sival* areas from *bajo*, *Tintal*, and *Chechemal* forest areas. The use of both phytoliths assemblages and phytolith indices seems to be particularly appropriate to differentiate opened, closed, and transitional plant environments. The consistency of the results between modern plant communities and phytolith assemblages demonstrates the validity of our methodology.

However, the environments of this study are only part of Petén environments. “Natural” and “anthropic” environments were certainly much more diversified in Maya times, and are still today. Thus, the realization of a current reference collection of phytoliths in anthropized areas is necessary to define more precisely the interpretation of the fossil phytolith assemblages from the occupation period of the Naachtun site. Some other environments, such as the savannahs of central Petén (Lundell, 1937) or the drier forests of northern Yucatán could have reached the Naachtun region during drier climatic periods. More humid environments of the lake or lagoon variety (Yaxha, Dos Lagunas, etc.) could also have been present during wet phases. Modern soil sampling of these environments also seems necessary to construct a complete and current phytolith reference system for Maya environments on the Petén level.

Finally, the characterization of plant communities could be improved in taxonomic terms. As we have seen, the Naachtun ecosystems are mostly dominated by woody dicotyledons. A general study on the sclereids in such closed environments is needed to refine the taxonomic precision. More precise taxonomy could also be achieved by combining phytolith data with the data on other local bioindicators which are sensitive to variations in climatic parameters and ecological plant niches.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgements

This research is supported by the Projet Naachtun 2010–2018 (Dir. Ph. Nondédéo), the Project HydroAgro (coord. E. Lemonnier et C. Castanet), The Project PAYAMA (coord. A. Garnier and E. Lemonnier), the LabEx Dynamite (ComUE heSam), the Ministère des Affaires Étrangères (France), the Pacunam foundation, the Perenco company (Guatemala), the CNRS (France) and the Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne. This research benefits from the institutional support of the Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (Guatemala).

This publication has received financial support from the Fondation des Treilles. The Fondation des Treilles, created by Anne Gruner Schlumberger, aims in particular to open and nurture dialogue between science and the arts in order to advance contemporary creation and research. It also welcomes researchers and writers in the field of Les Treilles (Var) www.les-treilles.com.

Table 3
(appendix): Table of correspondence between nomens and scientific names of plant species, relative richness of nomens by plant environments: O: Dominant or typical species of an ecosystem; +++: Species observed in at least 75% of the sampling points of an ecosystem; ++: Species observed in at least 50% of the sampling points of an ecosystem; +: Species observed in at least 25% of the sampling points of an ecosystem; -: Species observed in at least one time of the sampling points of an ecosystem.

	Local name	Scientific name	Ram	Car	Esc	Che	Tin	Siv	
Trees (>8 m.)	<i>Amate</i>	<i>Ficus aurea</i> Nutt. <i>Ficus cotinifolia</i> Kunth <i>Ficus obtusifolia</i> Kunth				+	-		
	<i>Bakelac</i>	<i>Laetia thamnina</i> L.	++	++	-				
	<i>Canizte</i>	<i>Pouteria campechiana</i> (Kunth) Baehni	+			-			
	<i>Caoba</i>	<i>Swietenia macrophylla</i> King				-			
	<i>Catalox</i>	<i>Swartzia cubensis</i> (Britton & Wilson) Standl.	-						
	<i>Cedro</i>	<i>Cedrela odorata</i> L.	-	-					
	<i>Ceibal</i>	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.							
	<i>Chaltecoco</i>	<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standl. <i>Caesalpinia violacea</i> (Mill.) Standl.	+	+		-			
	<i>Chechem negro</i>	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb.					O	-	
	<i>Chicozapote</i>	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P.Royen	O	++	++	++			
	<i>Copal</i>	<i>Protium copal</i> (Schltdl. & Cham.) Engl.	++	++	-	-			
	<i>Guaya</i>	<i>Melicoccus oliviformis</i> Kunth	++		-	-			
	<i>Huevo de caballo</i>	<i>Tabernaemontana donnell-smithii</i> Rose ex J.D.Sm.	-						
	<i>Jabin</i>	<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	-				++		
	<i>Jobillo</i>	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	+						
	<i>Jobo</i>	<i>Spondias mombin</i> L.	++	++	+	+			
	<i>K'olo'k</i>	<i>Talisia floresii</i> Standl.	+	+	+				
	<i>Limonaria</i>	<i>Trichilia minutiflora</i> Standl.					-		
	<i>Maculiz</i>	<i>Tabebuia heterophylla</i> (DC.) Britton <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A.DC					-		
	<i>Madre de Cacao</i>	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.					-		
	<i>Malerio blanco</i>	<i>Aspidosperma megalocarpon</i> Müll.Arg.	+++	++	++	-			
	<i>Manchiche</i>	<i>Lonchocarpus castilloi</i> Standl.	-			-			
	<i>Mano de leon</i>	<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne. & Planch.	-	-					
	<i>Matapalo</i>	<i>Clusia flava</i> Jacq.	-						
	<i>Palo de gusano</i>	<i>Caesalpinia yucatanensis</i> Greenm. <i>Lonchocarpus guatemalensis</i> Benth.					-		
	<i>Palo de jiote</i>	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	+	-	-	-			
	<i>Pimienta</i>	<i>Pimenta dioica</i> (L.) Merr.	++	++	++	-			
	<i>Ramón</i>	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	O	++	++	+			
	<i>Ramón colorado</i>	<i>Trophis racemosa</i> (L.) Urb.	-	-	-	-			
	<i>Roble</i>	<i>Bourreria mollis</i> Standl. <i>Ehretia tinifolia</i> L.					++		
	<i>Siricote</i>	<i>Cordia decandera</i> A.DC.					-		
	<i>Tempisque</i>	<i>Sideroxylon floribundum</i> (Lundell) T.D.Penn.	-						
	<i>Testap</i>	<i>Guettarda combsii</i> Urb.	-						
	<i>Tinto</i>	<i>Haematoxylum campechianum</i> L.					++	O	
	<i>Yasnic</i>	<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.					O	-	
	<i>Zapote,</i>	<i>Manilkara chicle</i> (Pittier) Gilly <i>Pouteria amygdalina</i> (Standl.) Baehni <i>Pouteria belizensis</i> (Standl.) Cronquist <i>Pouteria durlandii</i> (Standl.) Baehni <i>Pouteria glomerata</i> (Miq.) Radlk. <i>Pouteria reticulata</i> (Engl.) Eyma <i>Pouteria viridis</i> (Pittier) Cronquist <i>Sideroxylon stevensonii</i> (Standl.) Standl. & Steyerm. <i>Sideroxylon tepicense</i> (Standl.) T.D.Penn.	O	++	++	+	+		
	Shrubs (<8 m.)	<i>Arozillo</i>	ind.					++	
		<i>Cacho de toro</i>	ind.				-	+	
		<i>Cascarillo</i>	<i>Croton guatemalensis</i> Lotsy <i>Croton reflexifolius</i> Kunth					O	-
		<i>Chaya</i>	<i>Cnidocolus aconitifolius</i> (Mill.) I.M.Johnst.	++	+	++	-		
		<i>Chechem blanco</i>	<i>Cameraria latifolia</i> L.				+		
		<i>Cordoncillo</i>	<i>Piper amalago</i> L. <i>Piper psilorhachis</i> C.DC.	O	++	++	-		
		<i>Guayavillo</i>	<i>Eugenia axillaris</i> (Sw.) Willd. <i>Eugenia capuli</i> (Schltdl. & Cham.) Hook. & Arn. <i>Eugenia ibarrae</i> Lundell <i>Eugenia tikalana</i> Lundell	-				+++	
		<i>Jiesmo</i>	<i>Acacia angustissima</i> (Mill.) Kuntze <i>Acacia dolichostachya</i> S.F.Blake <i>Lysiloma acapulcense</i> (Kunth) Benth.	-	-	-		++	
		<i>Katsin</i>	<i>Acacia gaumeri</i> S.F.Blake <i>Acacia riparia</i> Kunth	-	-	-		+	
		<i>Laurel</i>	<i>Nectandra coriacea</i> (Sw.) Griseb. <i>Nectandra sanguinea</i> Rol. ex Rottb.	+	-	-	-		

Table 3 (continued)

	Local name	Scientific name	Ram	Car	Esc	Che	Tin	Siv
	Majagua	<i>Hampea tomentosa</i> (C.Presl) Standl. <i>Hampea trilobata</i> Standl. <i>Mortoniendron guatemalense</i> Standl. & Steyerm.				++		
	Manzanita	<i>Malpighia glabra</i> L. <i>Malpighia lundellii</i> C.V. Morton	–	–		–		
	Mora	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D.Don ex Steud.				++	+	
	Nanze	<i>Byrsonima bucidifolia</i> Standl. <i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth				+		
	Palo de Hormigas	<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm.	–		–	–		
	Piñón	<i>Jatropha curcas</i> L.	–			–		
	Quiebrahacha	<i>Wimmeria bartlettii</i> Lundell <i>Wimmeria concolor</i> Cham. & Schldtl.	–					
	Subin	<i>Acacia collinsii</i> Saff. <i>Acacia cornigera</i> (L.) Willd.		–	+	+++		
	Zarza	<i>Mimosa pigra</i> L.						O
	Zikiya	<i>Chrysophyllum mexicanum</i> Brandegee			+	–		
Palms	<i>Chrysophyllum oliviforme</i> L.							
	Bayal	<i>Desmoncus chinantlensis</i> Liebm. ex Mart.	–	–	+			
	Cambray	<i>Chamaedorea seifrizii</i> Burret	++		++	++		
	Escobo	<i>Cryosophila stauracantha</i> (Heynh.) R.J.Evans	++		O	+		
	Guano / Botan	<i>Sabal mauritiformis</i> (H.Karst.) Griseb. & H.Wendl. <i>Sabal mexicana</i> Mart.	+	+	O	+		
	Xate	<i>Chamaedorea oblongata</i> Mart. <i>Chamaedorea elegans</i> Mart.	O	++	+	+		
	Bejuco de aro	<i>Bignonia aequinoctialis</i> L.	–					
Herbs	Calabaza de raton	<i>Cucurbita radicans</i> Naudin						++
	Carrizo	<i>Rhipidocladum bartlettii</i> (McClure) McClure		O				
	Lechuga	<i>Pistia stratiotes</i> L.						O
	Mozote ambra	<i>Teucrium vesicarium</i> Mill.						++
	Mozote macho	<i>Triumfetta semitriloba</i> Jacq.						++
	Navajuella	Cyperaceae ind.					–	++
	Tres marias	<i>Forchhammeria trifoliata</i> Radlk. ex Millsp.	–				–	+
	Tul'	<i>Cyperus articulatus</i> L.						O
	Yerba buena	<i>Mentha × piperita</i> L.						O
	Zakate ambra	<i>Panicum trichanthum</i> Nees						++
	Zakate de huecht	<i>Rhynchospora cephalotes</i>				+		
	Zakate I	<i>Olyra latifolia</i> L.	+++	++	++	++	++	
	Zakate II	<i>Kyllinga pumila</i> Michx.				+		+
Zakate III	<i>Cyperus ochraceus</i> Vahl				+		+	
Zakate IV	<i>Leptochloa virgata</i> (L.) P.Beauv.				–		–	
Zakaton	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.						O	
Zakaton II	Poaceae ind.						+	

References

- Abramiuk, M.A., Dunham, P.S., Scott Cummings, L., Yost, C., Pesek, T.J., 2011. Linking past and present: a preliminary paleoethnobotanical study of Maya nutritional and medicinal plant use and sustainable cultivation in the Southern Maya Mountains, Belize. *Ethnobot. Res. App.* 9, 257. <https://doi.org/10.17348/era.9.0.257-273>.
- Abrams, E.M., Rue, D.J., 1988. The causes and consequences of deforestation among the prehistoric Maya. *Hum. Ecol.* 16, 377–395. <https://doi.org/10.1007/BF00891649>.
- Albert, R.M., Bamford, M.K., Cabanes, D., 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quat. Int.* 148, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.026>.
- Aleman, J., Leys, B., Apema, R., Bentaleb, I., Dubois, M.A., Lamba, B., Lebamba, J., Martin, C., Ngomanda, A., Truc, L., Yangakola, J.-M., Favier, C., Bremond, L., 2012. Reconstructing savanna tree cover from pollen, phytoliths and stable carbon isotopes. *J. Veg. Sci.* 23, 187–197. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01335.x>.
- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Lézine, A.-M., Vincens, A., Schwartz, D., 1997. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 136, 213–229. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00089-8).
- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Mariotti, A., Soubies, F., 1999. Late Holocene Phytolith and Carbon-Isotope Record from a Latosol at Salitre, South-Central Brazil. *Quat. Res.* 51, 187–194. <https://doi.org/10.1006/qres.1998.2027>.
- Atran, S., Lois, X., Ucan Ek, E., 2004. Plants of the Petén Itza' Maya: Plantas de los maya itza' del Petén. *Memoirs Museum of Anthropology, University of Michigan, Ann Arbor*.
- Barboni, D., Bremond, L., 2009. Phytoliths of East African grasses: an assessment of their environmental and taxonomic significance based on floristic data. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 158, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.07.002>.
- Barboni, D., Bonnefille, R., Alexandre, A., Meunier, J.D., 1999. Phytoliths as paleoenvironmental indicators, West Side Middle Awash Valley, Ethiopia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 152, 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00045-0).
- Barboni, D., Bremond, L., Bonnefille, R., 2007. Comparative study of modern phytolith assemblages from inter-tropical Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 246, 454–470. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.012>.
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N., Cook, D., 2008. Human and natural impacts on fluvial and karst depressions of the Maya Lowlands. *Geomorphology* 101, 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.019>.
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N., Jones, J., Lohse, J., Guderjan, T., Bozarth, S., Millsbaugh, S., Bhattacharya, T., 2009. A review of human and natural changes in Maya Lowland wetlands over the Holocene. *Quat. Sci. Rev.* 28, 1710–1724. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.004>.
- Boyd, W.E., Lentfer, C.J., Torrence, R., 1998. Phytolith analysis for a wet tropics environment: Methodological issues and implications for the archaeology of Garua island, West New Britain, Papua New Guinea. *Palynology* 22, 213–228. <https://doi.org/10.1080/01916122.1998.9989510>.
- Bozarth, S.R., Guderjan, T.H., 2004. Biosilicate analysis of residue in Maya dedicatory cache vessels from Blue Creek, Belize. *J. Archaeol. Sci.* 31, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.08.002>.
- Bremond, L., Alexandre, A., Vela, E., Guiot, J., 2004. Advantages and disadvantages of phytolith analysis for the reconstruction of Mediterranean vegetation: an assessment based on modern phytolith, pollen and botanical data (Luberon, France). *Rev. Palaeobot. Palynol.* 129, 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.02.002>.
- Bremond, L., Alexandre, A., Wooller, M.J., Hély, C., Williamson, D., Schäfer, P.A., Majule, A., Guiot, J., 2008. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Glob. Planet. Chang.* 61, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.016>.
- Brenner, M., Hodell, D.A., Rosenmeier, M.F., Curtis, J.H., Binford, M.W., Abbott, M.B., 2001. Chapter 6 - Abrupt climate change and Pre-Columbian cultural collapse. In: Markgraf, V. (Ed.), *Interhemispheric Climate Linkages*. Academic Press, San Diego, pp. 87–103. <https://doi.org/10.1016/B978-012472670-3/50009-4>.

- Canuto, M.A., Estrada-Belli, F., Garrison, T.G., Houston, S.D., Acuña, M.J., Kováč, M., Marken, D., Nondédéo, P., Auld-Thomas, L., Castanet, C., Chatelain, D., Chiriboga, C.R., Drápela, T., Lieskovský, T., Tokovinin, A., Velasquez, A., Fernández-Díaz, J.C., Shrestha, R., 2018. Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala. *Science* 361, eaau0137. <https://doi.org/10.1126/science.aau0137>.
- Carozza, J.-M., Galop, D., Metallie, J.-P., Vanniere, B., Bossuet, G., Monna, F., Lopez-Saez, J.A., Arnauld, M.-C., Breuil, V., Forne, M., Lemonnier, E., 2007. Landuse and soil degradation in the southern Maya lowlands, from Pre-Classic to Post-Classic times: the case of La Joyanca (Petén, Guatemala). *Geodin. Acta* 20, 195–207. <https://doi.org/10.3166/ga.20.195-207>.
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G.A., Torrescano-Valle, N., 2012. Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán peninsula, Mexico. *Vegetat. Hist. Archaeobot.* 21, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0355-1>.
- Castanet, C., Purdue, L., Lemonnier, E., Nondédéo, P., 2016. Dynamiques croisées des milieux et des sociétés dans les basses terres tropicales mayas: hydrosystème et agrosystème à Naachtun (Guatemala). *Les nouvelles de l'archéologie*, 32–37. <https://doi.org/10.4000/nda.3275>.
- Chabot, Y., Garnier, A., Geria, I.M., 2018. Phytolith analysis from the archaeological site of Kota Cina (North Sumatra, Indonesia). *J. Archaeol. Sci. Rep.* 20, 483–501. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.04.033>.
- Chen, S.T., Smith, S.Y., 2013. Phytolith variability in Zingiberales: a tool for the reconstruction of past tropical vegetation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 370, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.10.026>.
- Collura, L.V., Neumann, K., 2017. Wood and bark phytoliths of West African woody plants. *Quat. Int.* 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR) 434, 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.070>.
- Diamond, J.M., 2005. *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Viking, New York.
- Dickau, R., Whitney, B.S., Iriarte, J., Mayle, F.E., Soto, J.D., Metcalfe, P., Street-Perrott, F.A., Loader, N.J., Ficken, K.J., Killeen, T.J., 2013. Differentiation of neotropical ecosystems by modern soil phytolith assemblages and its implications for palaeoenvironmental and archaeological reconstructions. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 193, 15–37. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2013.01.004>.
- Dunning, N.P., Luzzadder-Beach, S., Beach, T., Jones, J.G., Scarborough, V., Culbert, T.P., 2002. Arising from the Bajos: the evolution of a neotropical landscape and the rise of Maya civilization. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 92, 267–283. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.00290>.
- Dussol, L., Elliott, M., Michelet, D., Nondédéo, P., 2017. Ancient Maya sylviculture of breadnut (*Brosimum alicastrum* Sw.) and sapodilla (*Manilkara zapota* (L.) P. Royen) at Naachtun (Guatemala): a reconstruction based on charcoal analysis. *Quat. Int. Anthracol. Local to Global Significance of Charcoal Science - Part I* 457, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.10.014>.
- Ehrlich, Paul R., Ehrlich, Anne H., 2013. Can a collapse of global civilization be avoided? *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 280, 20122845. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2845>.
- Eichhorn, B., Neumann, K., Garnier, A., 2010. Seed phytoliths in West African Commelinaceae and their potential for palaeoecological studies. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 298, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.004>.
- Fedick, S.L., 2010. The Maya forest: Destroyed or cultivated by the ancient Maya? *PNAS* 107, 953–954. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913578107>.
- Fenwick, R.S.H., Lentfer, C.J., Weisler, M.I., 2011. Palm reading: a pilot study to discriminate phytoliths of four Arecaceae (Palmae) taxa. *J. Archaeol. Sci. Satellite Remote Sensing in Archaeology: Past, Present and Future Perspectives* 38, 2190–2199. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.03.016>.
- Fishkis, O., Ingwersen, J., Lamers, M., Denysenko, D., Streck, T., 2010. Phytolith transport in soil: a field study using fluorescent labelling. *Geoderma* 157, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.012>.
- Fredlund, G.G., Tieszen, L.T., 1994. Modern phytolith assemblages from the North American Great Plains. *J. Biogeogr.* 21, 321–335. <https://doi.org/10.2307/2845533>.
- Garnier, A., Neumann, K., Eichhorn, B., Lespez, L., 2013. Phytolith taphonomy in the middle- to late-Holocene fluvial sediments of Ounjougou (Mali, West Africa). *The Holocene* 23, 416–431. <https://doi.org/10.1177/0959683612463102>.
- Hansen, R.D., Bozarth, S., Jacob, J., Wahl, D., Schreiner, T., 2002. Climatic and environmental variability in the rise of Maya civilization: a preliminary perspective from northern Peten. *Anc. Mesoam.* 13, 273–295. <https://doi.org/10.1017/S0956536102132093>.
- Hastenrath, S., 1976. Variations in low-latitude circulation and extreme climatic events in the tropical Americas. *J. Atmos. Sci.* 33, 202–215. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<0202:VILLCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0202:VILLCA>2.0.CO;2).
- Hastenrath, S., 1984. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. *Mon. Weather Rev.* 112, 1097–1107. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1097:IVAACM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1097:IVAACM>2.0.CO;2).
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Medina-González, R., Can, E.I.-C., Albornaz-Pat, A., Guilderson, T.P., 2005. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quat. Res.* 63, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.11.004>.
- Honaine, M.F., Zucol, A.F., Osterrieth, M.L., 2009. Phytolith analysis of Cyperaceae from the Pampean region, Argentina. *Aust. J. Bot.* 57, 512–523. <https://doi.org/10.1071/BT09041>.
- Iriarte, J., 2003. Assessing the feasibility of identifying maize through the analysis of cross-shaped size and three-dimensional morphology of phytoliths in the grasslands of southeastern South America. *J. Archaeol. Sci.* 30, 1085–1094. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(02\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(02)00164-4).
- Iriarte, J., Paz, E.A., 2009. Phytolith analysis of selected native plants and modern soils from southeastern Uruguay and its implications for paleoenvironmental and archaeological reconstruction. *Quaternary International. Perspect. Phytolith Res.* 6th International Meeting on Phytolith Research 193, 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.008>.
- Islebe, G.A., Hooghiemstra, H., Brenner, M., Curtis, J.H., Hodell, D.A., 1996. A Holocene vegetation history from lowland Guatemala. *The Holocene* 6, 265–271. <https://doi.org/10.1177/095968369600600302>.
- Kealhofer, L., Piperno, D.R., 1998. Opal Phytoliths in Southeast Asian Flora. *Smithson. Contrib. Bot.*, 1–39. <https://doi.org/10.5479/si.0081024X.88>.
- Lentz, D.L., Hockaday, B., 2009. Tikal timbers and temples: ancient Maya agroforestry and the end of time. *J. Archaeol. Sci.* 36, 1342–1353. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.01.020>.
- Lentz, D.L., Magee, K., Weaver, E., Jones, J.G., Tankersley, K.B., Hood, A., Islebe, G., Ramos Hernandez, C.E., Dunning, N.P., 2015. Agroforestry and Agricultural Practices of the Ancient Maya at Tikal. In: Lentz, D.L., Dunning, N.P., Scarborough, V.L. (Eds.), *Tikal*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 152–185. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139227209.009>.
- Leyden, B.W., 2002. Pollen evidence for climatic variability and cultural disturbance in the maya lowlands. *Anc. Mesoam.* 13, 85–101. <https://doi.org/10.1017/S0956536102131099>.
- Liu, L., Jie, D., Liu, H., Li, N., Guo, J., 2013. Response of phytoliths in *Phragmites communis* to humidity in NE China. *Quat. Int.* 304, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.020>.
- Lu, H., Liu, K., 2003. Phytoliths of common grasses in the coastal environments of southeastern USA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 58, 587–600. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(03)00137-9).
- Lu, H.-Y., Wu, N.-Q., Yang, X.-D., Jiang, H., Liu, K., Liu, T.-S., 2006. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: phytolith-based transfer functions. *Quat. Sci. Rev.* 25, 945–959. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.014>.
- Lundell, C.L., 1932. Exploring Nohoxna: a lost city of the first Maya Empire. *Southwest. Rev.* 17, 395–406.
- Lundell, C.L., 1937. *The Vegetation of Peten*. Carnegie Institution, Washington, D.C.
- Lundell, C.L., 1938. Plants probably utilized by the old empire Maya of Petén and adjacent lowlands. *Pap. Michigan Acad. Sci. Arts Lett.* 24, 37–56. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015071693415&view=1up&seq=63>.
- Madella, M., Lancelotti, C., 2012. Taphonomy and phytoliths: a user manual. *Quat. Int.* 275, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.008>.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Ann. Bot.* 96, 253–260. <https://doi.org/10.1093/aob/mci172>.
- Martínez, E., Galindo-Leal, C., 2012. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. *Bot. Sci.*, 7. <https://doi.org/10.17129/botsci.1660>.
- McNeil, C.L., 2012. Deforestation, agroforestry, and sustainable land management practices among the Classic period Maya. *Quat. Int.* 249, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.055>.
- Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 2004. *The Limits to Growth: The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vt.
- Mercader, J., Bennett, T., Esselmont, C., Simpson, S., Walde, D., 2009. Phytoliths in woody plants from the Miombo woodlands of Mozambique. *Ann. Bot.* 104, 91–113. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp097>.
- Mulholland, S.C., 1989. Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: a comparison to general patterns. *J. Archaeol. Sci.* 16, 489–511. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(89\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0305-4403(89)90070-8).
- Neumann, K., Fahmy, A., Lespez, L., Ballouche, A., Huysecom, E., 2009. The Early Holocene palaeoenvironment of Ounjougou (Mali): Phytoliths in a multiproxy context. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 276, 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.03.001>.
- Neumann, K., Fahmy, A.G., Müller-Scheeßel, N., Schmidt, M., 2017. Taxonomic, ecological and palaeoecological significance of leaf phytoliths in West African grasses. *Quat. Int.* 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR) 434, 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.039>.
- Nondédéo, P., Morales-Aguilar, C., Patiño, A., Forné, M., Andrieu, C., Sion, J., Michelet, D., Arnauld, M.-C., Gillot, C., de León, M., Cotom, J., Lemonnier, E., Pereira, G., Barrios, I., 2012. Prosperidad económica en Naachtun: resultados de las dos primeras temporadas de investigación. In: Arroyo, B., Paiz Aragon, L., Mejía, H. (Eds.), *XXV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Asociación Tikal, Guatemala, pp. 227–235. http://www.asociaciontikal.com/wp-content/uploads/2017/03/019_Nondedeo_2.pdf.
- Nondédéo, P., Patiño, A., Sion, J., Michelet, D., Morales-Aguilar, C., 2013. Crisis multiples en Naachtun: aprovechadas, superadas e irreversibles. *Millenary Maya Societies, Past Crises and Resilience*, pp. 122–147. http://mesoweb.org/publications/MMS/9_Nondedeo_et_al.pdf.
- Novello, A., Barboni, D., Berti-Equille, L., Mazur, J.-C., Poilecot, P., Vignaud, P., 2012. Phytolith signal of aquatic plants and soils in Chad, Central Africa. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 178, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.03.010>.
- Novello, A., Bamford, M.K., van Wijk, Y., Wurz, S., 2018. Phytoliths in modern plants and soils from Klasies River, Cape Region (South Africa). *Quat. Int.* 464, 440–459. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.10.009>.
- Ollendorf, A.L., 1992. Toward a classification scheme of Sedge (Cyperaceae) phytoliths. In: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues*. Advances in Archaeological and Museum Science. Springer US, Boston, MA, pp. 91–111. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_5.
- Ollendorf, A.L., Mulholland, S.C., Rapp, G., 1988. Phytolith analysis as a means of plant identification: *Arundo donax* and *Phragmites communis*. *Ann. Bot.* 61, 209–214. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087544>.
- Osterrieth, M., Madella, M., Zurro, D., Fernanda Alvarez, M., 2009. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quat. Int.* 193, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.002>.

- Pearsall, D.M., Piperno, D.R., 1990. Antiquity of maize cultivation in Ecuador: Summary and reevaluation of the evidence. *Am. Antiqu.* 55, 324–337. <https://doi.org/10.2307/281650>.
- Pearsall, D.M., Chandler-Ezell, K., Chandler-Ezell, A., 2003. Identifying maize in neotropical sediments and soils using cob phytoliths. *J. Archaeol. Sci.* 30, 611–627. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(02)00237-6).
- Pennington, T.D., Sarukhán, J., 2005. *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies.* Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.
- Piperno, D.R., 1988. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective.* Academic Press, San Diego.
- Piperno, D.R., 2006. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists.* AltaMira Press, Lanham, MD.
- Piperno, D.R., Pearsall, D.M., 1998. The silica bodies of tropical American grasses: morphology, taxonomy, and implications for grass systematics and fossil phytolith identification. *Smithson. Contrib. Bot.* 85, 1–40.
- Piperno, D.R., Andres, T.C., Stohert, K.E., 2000. Phytoliths in cucurbita and other neotropical cucurbitaceae and their occurrence in Early Archaeological sites from the Lowland American tropics. *J. Archaeol. Sci.* 27, 193–208. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0443>.
- Postek, M.T., 1981. The occurrence of silica in the leaves of *Magnolia grandiflora* L. *Bot. Gaz.* 142, 124–134. <https://doi.org/10.1086/337202>.
- Prat, H., 1948. General features of the epidermis in *Zea mays*. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 35, 341–351. <https://doi.org/10.2307/2394699>.
- Reese-Taylor, K., Mathews, P., Zamora, M., Rangel, M., Walker, D.S., Alvarado, S., Arredondo, E., Morton, S., Parry, R., Salazar, B., Seibert, J., 2005. *Proyecto Arqueológico Naachtun: Resultados preliminares de la primera temporada de campo 2004.* XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, pp. 85–95.
- Rovner, I., 1971. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quat. Res.* 1, 343–359. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90070-6).
- Runge, F., 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa—quantities, shapes, classification, and spectra. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 107, 23–53. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(99\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00018-4).
- Sánchez-Sánchez, O., Islebe, G.A., 2002. Tropical forest communities in southeastern Mexico. *Plant Ecol.* 158, 183–200. <https://doi.org/10.1023/A:1015509832734>.
- Schultze, M.D., Whitacre, D.F., 1999. A classification and ordination of the tree community of Tikal National Park. *Bull. Florida Mus. Nat. Hist.* 169–297.
- Servigne, P., Stevens, R., 2015. *Comment tout peut s'effondrer: petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes.* Éditions du Seuil, Paris.
- Standley, P.C., Steyermark, J.A., 1946. *Flora of Guatemala.* Natural History Museum Chicago, Chicago.
- Strömberg, C.A.E., 2004. Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the great plains of North America during the late Eocene to early Miocene. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* Evolution of grass-dominated ecosystems during the late Cenozoic Session at the North American Paleontological Convention 2001 (2007), 239–275. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2003.09.028>.
- Strömberg, C.A.E., 2009. Methodological concerns for analysis of phytolith assemblages: Does count size matter? *Quat. Int. Perspect. Phytolith Res.* 6th International Meeting on Phytolith Research 193, 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.11.008>.
- Tainter, J.A., 1988. *The collapse of complex societies.* New Studies in Archaeology. Cambridge University Press, Cambridge, Cambridgeshire; New York.
- Thomas, R., 2011. *Anatomie comparée des palmiers: Identification-assistée par ordinateur, Applications en paléobotanique et en archéobotanique.* Ph.D. Thesis. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.
- Thompson, K.M., Hood, A., Cavallaro, D., Lentz, D.L., 2015. Connecting contemporary ecology and ethnobotany to ancient plant use practices of the Maya at Tikal [WWW Document]. *Paleoecology of an Ancient Maya City, Tikal* <https://doi.org/10.1017/CBO9781139227209.008>.
- Thorn, V.C., 2004. Phytolith evidence for C4-dominated grassland since the early Holocene at Long Pocket, northeast Queensland, Australia. *Quat. Res.* 61, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.12.002>.
- Tomlinson, P.B., 1961. *Anatomy of the Monocotyledons.* Palmae vol. 2. Clarendon Press, Oxford University.
- Turner, B.L., Sabloff, J.A., 2012. Classic period collapse of the Central Maya Lowlands: Insights about human-environment relationships for sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 13908–13914. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210106109>.
- Twiss, P.C., 1992. Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths. In: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science.* Springer US, Boston, MA, pp. 113–128. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_6.
- Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M., 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33, 109. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300010030x>.
- Wahl, D., Byrne, R., Schreiner, T., Hansen, R., 2006. Holocene vegetation change in the northern Peten and its implications for Maya Prehistory. *Quat. Res.* 65, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.10.004>.
- Wahl, D., Estrada-Belli, F., Anderson, L., 2013. A 3400 year paleolimnological record of prehispanic human-environment interactions in the Holmul region of the southern Maya lowlands. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 379–380, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.03.006>.
- Watling, J., Iriarte, J., 2013. Phytoliths from the coastal savannas of French Guiana. *Quat. Int. Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 162–180. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.10.030>.
- Watling, J., Iriarte, J., Whitney, B.S., Consuelo, E., Mayle, F., Castro, W., Schaan, D., Feldpausch, T.R., 2016. Differentiation of neotropical ecosystems by modern soil phytolith assemblages and its implications for palaeoenvironmental and archaeological reconstructions II: Southwestern Amazonian forests. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 226, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.12.002>.
- Wilding, L.P., Drees, L.R., 1973. Scanning electron microscopy of opaque opaline forms isolated from forest soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 37, 647. <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040047x>.
- Wilson, E.M., 1980. *Physical geography of the Yucatan Peninsula.* Yucatan: A world apart. University of Alabama Press, Tuscaloosa.
- Zurro, D., 2018. One, two, three phytoliths: assessing the minimum phytolith sum for archaeological studies. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 10, 1673–1691. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0479-4>.

- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 4 -

PAYsages Agraires d'aujourd'hui en terre MAYa

Le référentiel moderne des assemblages phytolithiques réalisé à Naachtun a permis de démontrer que, pour la zone maya, les phytolithes pouvaient participer à discriminer ces écosystèmes forestiers tropicaux. Ce travail ne permet pas, toutefois, d'aborder la question des pratiques agricoles passées sur la base des phytolithes. En effet, les contextes écologiques modernes de Naachtun sont assez peu anthropisés et ne peuvent jouer le rôle d'analogues pour les environnements cultivés. Le projet PAYAMA a donc eu pour but de mener cette démarche actualiste à 50km au sud de Naachtun, au sein de la communauté agroforestière de Uaxactún.

Le village de Uaxactún est constitué d'un millier d'habitants dont la plupart dépendent des activités agricoles menées par leurs pairs. La plupart des agriculteurs du village cultivent la *milpa*, c'est-à-dire qu'ils pratiquent une agriculture du maïs itinérante et d'abattis-brûlis, considérée comme traditionnelle aux basses-terres tropicales. La plupart possède également des zones de jardins riches en cultigènes et arbres fruitiers. Le Projet PAYAMA a pour but d'étudier l'enregistrement de ces pratiques dans les sols par différents indicateurs géomorphologiques ou biologiques. Au sein de ce projet, j'ai étudié tout particulièrement le signal phytolithique des différentes pratiques agricoles menées par les cultivateurs de Uaxactún.

Dix parcellaires, des ensembles de parcelles, ont été sélectionnés pour mener cette étude. Ces 10 parcellaires sont composés d'une trentaine de parcelles correspondant à la diversité des pratiques agricoles. En majorité, ce sont des *milpa* et des jardins qui sont étudiés même si la plupart des autres types de parcelles ont également été prélevés (brûlis, jachère, *aguada*, savane, fougeraie). Chaque parcelle a fait l'objet d'un entretien ethnobotanique sur l'histoire et la végétation de la parcelle ainsi que d'un prélèvement de surface du sol. Le croisement de ces informations avec les données phytolithiques permet de mieux interpréter les assemblages.

Les échantillons de parcelles sont tous dominés par des phytolithes de dicotylédones ligneuses mais surtout de palmiers. Aussi, ni l'ouverture agricole des parcellaires, ni les cultigènes producteurs de phytolithes spécifiques n'y sont enregistrés. Il semble évident que cette constance dans les assemblages résulte de modes de dépôt en lien avec les cycles écologiques de la végétation lors de l'abattis-brûlis. Les cycles courts de *milpa* (1 à 2 ans) associés à une récolte des cultivars vont diminuer le stock de phytolithes disponibles pour un dépôt naturel et un enregistrement de la pratique dans le sol. A l'inverse, la forêt initiale, avant la perturbation agricole, associée à des cycles de jachères, rapides à longues (de 2 à 8 ans), favorisant la pousse de ligneux et de palmiers, enrichit le sol en phytolithes diagnostiques. Ainsi, il ressort de ce référentiel que l'agriculture itinérante avec abattis-brûlis, telle qu'elle est pratiquée actuellement, n'est pas enregistrée par les phytolithes.

- CHAPITRE 4 -

PAYsages Agraires d'aujourd'hui en terre MAYa

Introduction :

Le travail sur les assemblages de phytolithes de Naachtun (Chap.3) nous a montré leur capacité à signer les environnements végétaux du Petén. Toutefois, dans l'optique d'étudier l'impact des civilisations mayas sur les paysages végétaux passés, il est nécessaire d'élargir le spectre des environnements modernes étudiés et notamment de calibrer la signature phytolithique des environnements agricoles qui sont prioritaires. En effet, les phytolithes ont été peu étudiés dans ces contextes en Amérique centrale, malgré l'importance des questions agricoles dans les projets archéologiques de la zone tropicale maya.

Le Projet PAYAMA¹ (Paysage Agraire d'hier et aujourd'hui en terre MAYa), conduit par Eva Lemonnier (Paris I) et Aline Garnier (UPEC), a pour but de construire et de croiser des référentiels modernes d'indicateurs (Phytolithes, Charbons, Micromorphologie, Signal incendie, etc.), enregistrés par les sols, afin de caractériser les signatures paléoenvironnementales de pratiques et de paysages agricoles. Le village de Uaxactún, situé à une cinquantaine de kilomètres au sud de Naachtun, présente plusieurs avantages quant à la réalisation de ce projet : i) les environnements végétaux sont sensiblement les mêmes qu'à Naachtun, ii) les pratiques agraires sont diversifiées et certaines sont supposées traditionnelles (ex : l'abattis-brûlis) et iii) de nombreux travailleurs du projet Naachtun sont également habitants et cultivateurs à Uaxactún, nous facilitant ainsi l'accès à leurs parcelles.

Au sein de ce projet, j'ai réalisé une étude des assemblages de phytolithes des sols modernes sur différents types de parcelles agricoles. Différentes hypothèses se posent sur la capacité des phytolithes à enregistrer des pratiques agricoles dans les sols et également à les différencier entre elles. En plus de compléter la gamme des environnements végétaux étudiés au Petén, ce travail a pour objectif d'améliorer l'interprétation des échantillons fossiles de Naachtun dans leur composante anthropique et ainsi évaluer l'impact des Mayas sur leurs environnements.

I. Communauté Forestière à Uaxactún : Entre Agricultures et Forêts

1. Contexte géographique de Uaxactún

Le village de Uaxactún, situé à 23km au nord du site de Tikal, correspond au terminus de la route départementale PET-3 et également au départ de la piste forestière vers *Dos Lagunas*, *Rio Azul* et *Naachtun*. Il se situe à califourchon entre deux grandes régions géomorphologiques : l'escarpement de *Buenavista* et *le bajo de la Juventud*. Les limites ouest du territoire

¹ Financement SARDYN – LabEx DynamiTe 2017-2019

de Uaxactún longent l'escarpement *Buenavista* (Fig 4.1) qui marque la portion sud-est de l'EIR (*Elevated Interior Region*), une plateforme calcaire déformée et surélevée qui se trouve au centre de la péninsule du Yucatán (Dunning et al., 2012). Cette portion de l'EIR est intégrée à une plus large région, de sa partie sud, qu'est le plateau central du Petén (voir chapitre 1).

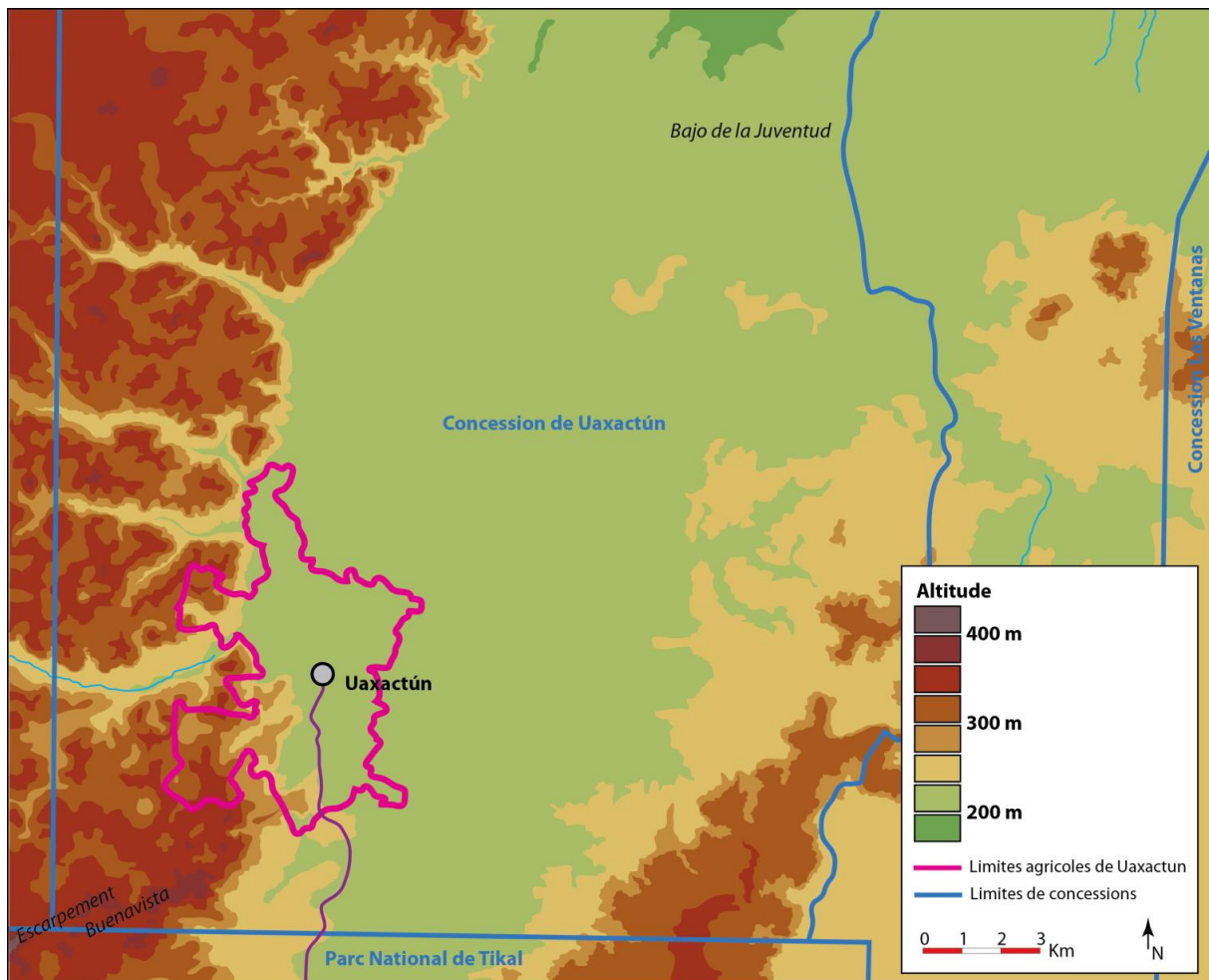


Figure 4.1 – Localisation du village de Uaxactún et de sa zonation agricole dans la concession à Usage Multiple éponyme (Fig 4.2) en fonction des grands domaines d'altitudes (modifié d'après OMYC Uaxactún)

A l'est de l'escarpement *Buenavista*, le paysage est fracturé en horst et graben et correspond à la région des trois rivières (Dunning et al., 2015). Ces grabens forment des dépressions à sols argileux prenant la configuration de *bajos*. Le village de Uaxactún se situe dans la terminaison sud d'un grand *bajo*, dit *de la Juventud* (Fig 4.1), alimenté au nord par le *Rio Azul* (hors carte). De plus petites dépressions, souvent en eau saisonnièrement, sont présentes dans le *bajo de la Juventud* sur le territoire de Uaxactún mais aussi de manière plus pérenne dans le centre du village où elles sont répertoriées sous le nom d'*aguada*. A Uaxactún, nous avons dénombré au moins 4 *aguada* servant quotidiennement à l'alimentation en eau des habitants dans l'enceinte du village. L'alimentation en eau est également fournie par un réservoir surélevé qui pompe dans une des nappes karstiques. A l'est de Uaxactún se trouve un nouvel escarpement, enclavant ainsi le village dans le sud du *bajo de la Juventud* (Fig 4.1).

Tout comme à Naachtun, les sols et les forêts associés aux environnements de *bajo* de Uaxactún sont typiques du Petén. Les sols bien drainés des escarpements, des zones de collines et de leurs versants, sont généralement argileux, peu profonds et reposent sur des calcaires. En pied de pente, ces sols de collines tendent à former des zones de transition avec les sols des dépressions, ils sont argileux, plus profonds et marqués dans leur structure par les variations climatiques saisonnières. Associées à ces sols et à la topographie, les forêts de Uaxactún sont classées entre les forêts hautes des zones d'escarpements et de collines riches en Sapotaceae, Moraceae, Sapindaceae, Meliaceae et les forêts des dépressions, de *bajo*, composées majoritairement par des petits arbres appartenant aux Fabaceae, Euphorbiaceae, Anacardiaceae mais aussi par des zones de savanes humides riches en Poaceae et Cyperaceae (Pennington et Sarukhán, 2005). Les zones végétales situées entre ces deux types d'écosystèmes végétaux sont, en général, marquées par la présence de nombreux palmiers qui forment une transition végétale.

2. Vivre de la forêt à Uaxactún

La communauté villageoise de Uaxactún se situe dans une zone centrale de la Réserve « Biosphère Maya » (RBM), au cœur de la forêt du Petén. Cette communauté, d'environ un millier de personnes (160 foyers), occupe une concession (un droit d'exploitation) de forêt tropicale de 83 558 Ha dans une Zone à Usage Multiple de la RBM, définie par le gouvernement guatémaltèque (Fig 4.2). Ainsi, la communauté s'est vue octroyer les droits de gestion et d'usufruits sur les ressources de surface de la forêt. L'ensemble des activités est planifié par une assemblée d'habitants, désignés pour un mandat, qui est nommée la OMYC (Organización de Manejo y Conservación)².

A l'origine, et comme déjà vu dans le chapitre 1, Uaxactún est une cité maya qui a prospéré durant la période Classique (250 CE – 1000 CE). La réoccupation de Uaxactún, à la fin du XIX^{ème} siècle, coïncide avec l'augmentation des récoltes forestières de latex du **Chicozapote** (*Manilkara zapota*), le *chicle*, dans le cadre de l'industrie naissante du chewing-gum aux États-Unis. L'extraction de *chicle* est toujours une source de revenus pour les *uaxactuneros*, tout comme la récolte de la quatre-épices (*Pimenta dioica*), de la noix maya (*Brosimum alicastrum*) ou de quelques autres produits forestiers non-ligneux (Shoka, 2006). Radher (2014) rapporte que 30% des revenus monétaires totaux de la communauté (soit 60 à 80% des ménages à un moment de l'année) dépendent de la collecte des feuilles et des graines de trois espèces de palmiers **Xate** (*Chamaedorea oblongata*, *C. elegans*, *C. ernesti-augustii*) destinées aux marchés floricoles états-uniens et européens. Les produits ligneux de la forêt sont également prélevés et contrôlés dans le cadre de la scierie qui exporte du bois d'œuvre et/ou de service. Un autre apport monétaire pour les habitants de Uaxactún provient du développement en cours de l'écotourisme en raison de sa proximité avec les milieux « naturels » de forêt, de son site

² <https://www.equatorinitiative.org/2017/05/29/organizacion-de-manejo-y-conservacion-omyc-uaxactun-management-and-conservation-organization/>

archéologique et du parc de Tikal au sud (Shoka, 2006). Une part de ces revenus monétaires annuels sert au paiement du bail d'occupation de la concession que Litow et al. (2001) évaluent à 142 049 \$ sur une période de 10 ans.

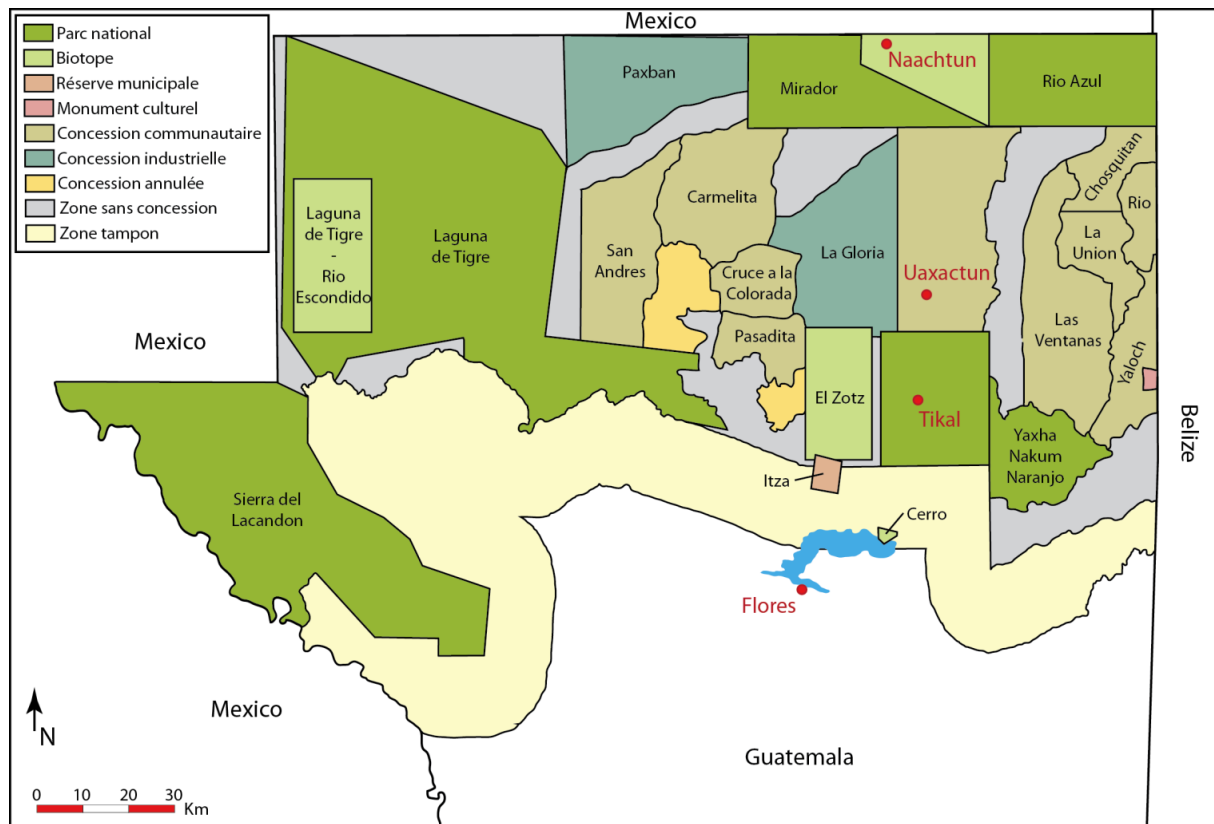


Figure 4.2 – Localisation des zonations éponymes de Tikal, Uaxactún et Naachtun au sein des parcs nationaux, biotopes, et concessions et usage mixte de la Réserve de Biosphère Maya, département du Petén, Guatemala (modifié d'après Radher, 2014)

Ces revenus, issus de l'exploitation des ressources de la forêt, sont à mettre en concours avec les pratiques vivrières des *uaxactuneros* dans les environs du village (Litow et al., 2001). Les panneaux répartis dans le village, concernant la restriction de la chasse d'animaux sauvages, reflètent une des pratiques locales pour l'apport de protéines animales (*Agouti paca*, *Mazama americana*, *M. pandora*, *Pecari tajacu*, *Penelope purpurascens*...). Ces apports carnés peuvent également provenir de pratiques « d'élevages » (animaux laissés en liberté au sein du village) comme les porcs et les volailles (poules, dindes). L'activité vivrière principale, relevée par Litow et al. (2001) auprès des habitants, reste la culture itinérante sur brûlis du triplet, maïs-courge-haricot, nommée *milpa*. Sur la trentaine d'habitants interrogés, plus des deux-tiers considéraient la *milpa* comme l'activité principale des ménages. Les *milpas* des *uaxactuneros* sont, en général, associées à des zones de « jardins », c'est-à-dire des zones où des plantes cultivées sont entretenues pour compléter le trio de cultigènes. Certaines des plantes de jardin peuvent également se retrouver à proximité des maisons comme les cocotiers, les bananiers, le taro ou encore les tamariniers. Toutefois, en fonction des contraintes climatiques et/ou économiques, les *uaxactuneros* adaptent leur mode de subsistance d'une année à l'autre (Litow et al., 2001).

II. Sélection des parcelles et méthodologie d'étude

1. Méthodologie générale d'étude des parcelles

L'objectif principal du projet PAYAMA est d'étudier l'enregistrement des pratiques agricoles dans les sols et la réponse de différents indicateurs (biologiques et physico-chimiques) à ces pratiques. L'étude porte sur des parcellaires (ensemble de parcelles) cultivés par des *uaxactuneros*. Quatre types de parcelles étaient visés particulièrement, du fait que ces pratiques sont supposées présentes chez les anciens Mayas. On y retrouve i) les *milpas*, ii) les jardins, iii) les parcelles fraîchement brûlées et iv) les jachères. Deux types d'approches ont été prévues pour l'étude de ces parcelles dans le cadre du projet PAYAMA : i) une étude systématique, ethnologique et naturaliste des parcelles et ii) une étude géomorphologique sous forme de sondages profonds avec des prélèvements pour l'étude des bioindicateurs et des mesures physico-chimiques.

L'étude systématique des parcelles a eu pour but de construire un référentiel actuel des assemblages de phytolithes en fonction de la végétation moderne et des pratiques agricoles menées sur ces mêmes parcelles. Pour chacune d'entre-elles, j'ai conduit une étude botanique avec l'aide d'un forestier *uaxactuneros* et ancien membre de la OMYC, Enecon Oxlaj. Ces études botaniques consistent à faire un relevé des espèces végétales présentes sur une parcelle et d'évaluer leur richesse relative sous la forme d'une absence/présence/domination. En lien avec cette étude botanique, nous avons prélevé les premiers centimètres des sols de surface de manière aléatoire et en plusieurs points de prélèvement sur une zone de 100m² pour chacune des parcelles. Ces prélèvements ont permis l'étude des assemblages des phytolithes modernes. En parallèle, pour chacune des parcelles, Eva Lemonnier et Lydie Dussol ont réalisé des entretiens avec les paysans propriétaires des parcelles afin d'en avoir un historique. La connaissance de l'histoire d'une parcelle et des espèces végétales, sauvages ou cultivées, présentes va permettre d'interpréter les assemblages de phytolithes dans un cadre temporel et écologique. C'est cette approche et ces étapes que je vais présenter au sein de ce chapitre.

La seconde approche du programme PAYAMA a consisté à sélectionner et étudier une zone d'une parcelle d'intérêt, comme une *milpa*, un jardin ou une jachère, afin de comprendre comment les pratiques agraires sont enregistrées dans les sols. Huit de ces espaces ont été sélectionnés pour y effectuer des sondages pédologiques (jusqu'à 1 mètre de profondeur – Tab 4.1). Sur ces sondages, Aline Garnier, Louise Purdue et Cyril Castanet ont effectué des relevés stratigraphiques et des prélèvements d'échantillons pour des analyses en laboratoire. Ces prélèvements comprenaient des petits contenus pour des études physico-chimiques et de phytolithes, des volumes de plusieurs litres pour des analyses malacologiques, anthracologiques et des prélèvements micromorphologiques sous forme de blocs pour les analyses associées.

2. Localisation et types de parcelles.

Afin de pouvoir étudier les parcelles, nous avons organisé une réunion publique adressée aux paysans *uaxactuneros*, relayée par la OMYC et par des habitants ayant travaillé avec nous sur le projet archéologique de Naachtun. Lors de cette réunion, nous avons rassemblé un peu plus d'une trentaine de *uaxactuneros* afin de leur présenter le projet PAYAMA. Sur ce quorum, nous avons reçu une demi-douzaine de propositions de visites de parcelles. D'autres propositions se sont rajoutées au cours de la semaine de terrain. Finalement, nous avons retenu 10 agriculteurs, dont les parcelles correspondaient à nos attentes.

Les parcelles de ces 10 cultivateurs sont localisées tout autour du village dans un périmètre agricole légalement défini (Fig 4.3). La moitié des parcelles est localisée au sud-ouest du village sur les premières élévations de l'escarpement *Buenavista* (Fig 4.1) tandis que l'autre moitié des parcelles est dispersée dans les zones de plus faibles altitudes du sud du *bajo de la Juventud* (Fig 4.1,4.3). Une inclinaison principale se retrouve selon un axe ouest-est, où les altitudes des parcelles sud-ouest avoisinent les 300m tandis que les altitudes des parcelles à l'est ont été mesurées entre 100 et 150 mètres. La sélection de ces parcelles s'est principalement faite en fonction de la disponibilité du propriétaire, du nombre et de la diversité de ses parcelles mais également de la présence ou non d'un brulis récent, plutôt que par les conditions topographiques.

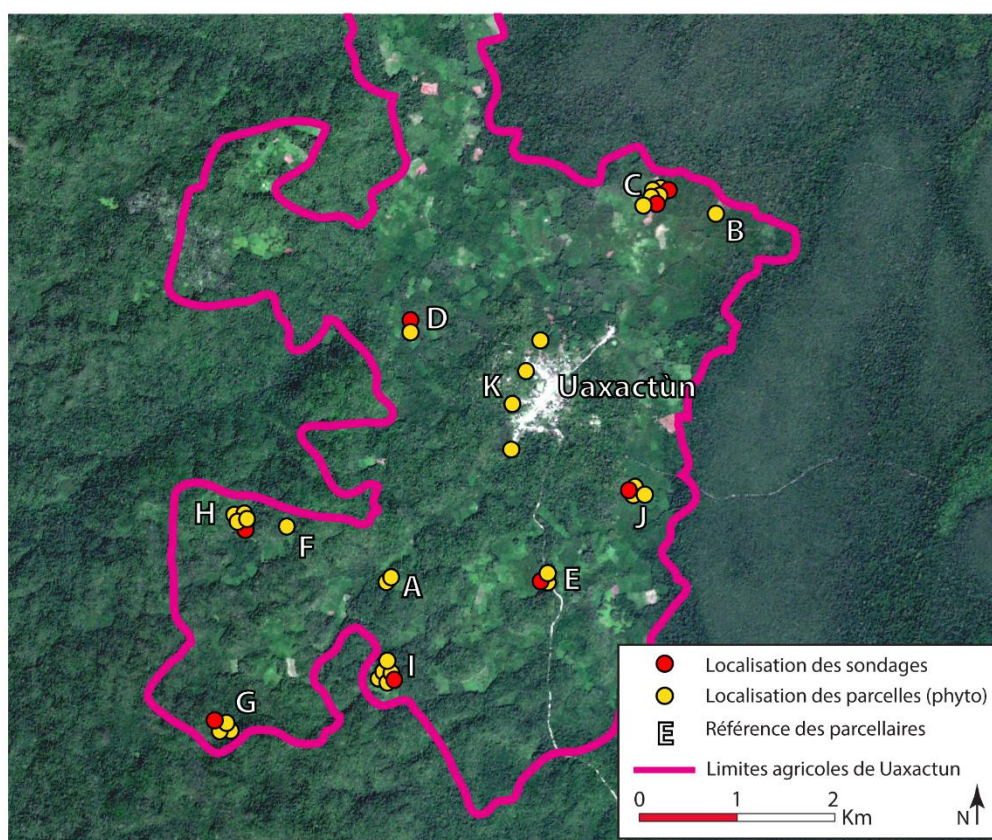


Figure 4.3 : Localisation des parcelles agricoles et sondages étudiés sur le territoire de Uaxactun dans le cadre du projet PAYAMA (modifié d'après Lemonnier et Garnier, LabEX DynamiTe)

Pour chaque parcellaire d'un paysan, entre 1 et 5 types de parcelles ont été étudiés (Tab 4.1). Pour chacun d'entre eux, au minimum un des 4 types de parcelles présélectionnées était présent. Une *milpa* a été étudiée pour la moitié des agriculteurs. L'autre moitié possédait au minimum un jardin et/ou une jachère (Tab 4.1). Pour chacune de ces parcelles, d'autres attenantes, mais de types différents, pouvant être des brûlis, des jachères, des jardins, de la forêt environnante, de la savane ou une zone humide, ont également été étudiées. Finalement, 31 parcelles ont été retenues pour notre étude et l'on dénombre parmi celles-ci, 6 parcelles de *milpas*, 11 parcelles de jardin (dont 1 dans le village), 3 parcelles de brûlis récent, 3 jachères, 2 *aguada*, 2 zones de terrain vague du village, 1 savane et 1 fougeraie (Tab 4.1).

A Don Jorge Xxx Par. Phyto P01; P02 Sondage	B Don Jorge Guera Par. Phyto P03 Sondage	C Don Enecon Oxlaj Par. Phyto P04; P05; P06; P18; P24 Sondage S01; S06	D Don Francisco Choc Par. Phyto P07 Sondage S02
E Don Alfredo Pop Par. Phyto P08; P09 Sondage S03	F Don Marcus Pop Par. Phyto P10 Sondage	G Don Francisco Pop Par. Phyto P11; P12; P13 Sondage S04	H Don Edison Pop Par. Phyto P14; P15; P16; P17 Sondage S05
I Don Giovanni Benites Hernandez Par. Phyto P19; P20; P21; P22; P23 Sondage S07	J Don Toribio Par. Phyto P26; P27; P28 Sondage S08	K Uaxactun Par. Phyto P29; P30; P31; P32 Sondage	Légendes : Parcelles Milpa Jardin / Verger Zone Rudérale Jachère / Forêt Brûlis Savanne Fougeraie Zone Humide Sondage pédologique

Tableau 4.1 : Énumération des parcelles sélectionnées par paysans et localisation des parcelles où étaient réalisés des sondages pédologiques

Cette sélection nous fournit au moins 3 parcelles pour chaque type de culture initialement recherché (Tab 4.1). Cette répétition des zones d'étude nous permet de nous préserver des réponses locales, taphonomiques ou de biais d'échantillonnage qui seraient propres à une parcelle en particulier. Aussi, en élargissant notre sélection à des zones forestières en bordure de parcellaires, nous complétons notre référentiel régional (Tab 4.1). De plus, ce type de prélèvement en zone non-cultivée nous offre la possibilité d'étalonner nos conclusions à des environnements périphériques moins travaillés par l'homme.

3. Réalisation du référentiel moderne de phytolithes

L'étude botanique, comme celle réalisée à Naachtun (Chapitre 3), consiste à répertorier les espèces végétales présentes pour les mettre en lien avec les assemblages de phytolithes. Ainsi, à l'échelle d'une parcelle, l'ensemble des arbres ligneux et palmiers encore présents a été relevé. Pour une meilleure représentation botanique des parcelles, les arbres à la périphérie des parcelles ont également été relevés puisqu'ils pouvaient avoir été présents par le passé sur la parcelle. Sur une zone plus restreinte de 100m², nous avons relevé la présence de plantes herbacées, monocotylédones ou dicotylédones, rudérales, naturelles ou cultivées. Chacune des plantes relevées sur les parcelles est indiquée en termes de présence-absence.

Sur cette même surface de 100m², nous avons prélevé les 2-3 premiers centimètres des sols de surface en de multiples points aléatoires pour étudier les assemblages modernes de phytolithes. Ce prélèvement composite nous permet de nous prémunir d'un enrichissement local en un morphotype particulier. Enfin, en prélevant le niveau de surface des sols modernes,

nous étudions des assemblages de phytolithes dont le temps moyen d'enregistrement n'est pas connu. Cette méthodologie de prélèvement nous permet d'avoir les mêmes types d'assemblages que ceux constituant les niveaux fossiles, c'est-à-dire un assemblage enregistré localement sur un temps non-défini.

Concernant l'étude des phytolithes, nous utilisons la classification ayant permis de discriminer les environnements végétaux de Naachtun (Chapitre 2, Chapitre 3). Il s'agit d'une classification où les morphotypes sont regroupés en principales classes morpho-écologiques dont je fais ici un court rappel.

Les grands morphotypes irréguliers, ornementés (faceted, pitted) ou lisses (psilate) sont classés comme *Sclereid* et indiquent la présence d'angiospermes arborés et ligneux (Dicotylédones, Magnoliidae – Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Strömberg, 2004).

Une part importante des morphotypes de phytolithes rencontrés ont une forme grossièrement sphérique et sont classés sous le terme *Globular*. L'ornementation des morphotypes a été considérée comme caractère distinctif de type écologique de plantes. Ainsi, les formes lisses et granuleuses, *Globular psilate* et *Globular decorate*, sont interprétées comme phytolithes de Dicotylédones ligneuses (Alexandre et al., 1997 ; Collura et Neumann, 2017). Les formes avec une ornementation facettée, les *Globular facetate*, sont, elles, plutôt associées aux courges et aux Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000). Enfin, les formes à ornementation plissée, *Globular plicate* et verruqueuse, *Globular verrucate*, sont respectivement associées aux monocotylédones Zingibérales et Marantaceae (Chen et Smith, 2013 ; Benvenuto et al., 2015). Enfin, les morphotypes épineux, sphérique, les *Globular echinate* ou hémisphérique, les *Hat shape*, sont associés aux Arecaceae qui les produisent en grande quantité même s'ils peuvent respectivement être indicateurs de Bromeliaceae et d'Orchidaceae (Fenwick et al., 2011 ; Benvenuto et al., 2015).

Dans les assemblages, on retrouve de nombreux morphotypes de petites tailles (< 25µm) tous interprétés comme formés de deux faces opposées à la morphologie disparate. L'ensemble de ces phytolithes sont classés au sein des GSSCP, c'est-à-dire des Gras Sicilica Short Cell Phytolith et sont produits dans la majorité des sous-familles de Poaceae (Twiss et al., 1969 ; Neumann et al., 2017). On retrouve des formes *Lobate*, aux faces lobées donc, de 2 à 5 ou 6 lobes, organisés ou non le long d'une tige. La plupart des formes *Lobate* sont produites chez les Parnicoïdeae. Les *Saddle* sont des formes où les faces ont des côtés opposés, convexes aux extrémités et concaves sur les bords, donnant un aspect de selle aux morphotypes. Ils sont majoritairement formés dans la sous-famille des Chloridoïdeae. Enfin, les *Rondel* possèdent une forme générale en cylindre où la face supérieure peut être ornementée de manière diagnostique comme chez le maïs qui présente une forme de vague, donnant son nom au morphotype *Rondel wavy* (Pearsall et al., 2003). Les grandes formes nommées *Crenate*, possédant 2 faces assez allongées et sinueuses, ne sont, elles, trouvées que dans la sous-famille des Pooïdeae (Barboni et Bremond, 2009).

Les nombreuses formes de cône creux avec une table (extension des marges du cône) sont regroupées sous le morphotype de *Papillae*. La forme du cône, le nombre de cônes, l'ornementation et la forme de la table possèdent de nombreux états de caractères et ne peuvent aujourd'hui bénéficier d'une classification fine. Toutes ces formes sont considérées comme produites par les Cyperaceae (Ollendorf et al., 1992 ; Honaine et al., 2009).

Le chapitre 2 présente des formes non observées à Naachtun mais typiques des zones tropicales. Des morphotypes Volcaniform peuvent être trouvés dans les assemblages. Les formes lisses les plus en relief, présentant une sorte de cratère, sont typiques des Musaceae et plus particulièrement de la banane (Vrydaghs et al., 2009 ; Chen et Smith, 2013 ; Chabot, 2017). Les Volcaniform aplanis avec des épines aux extrémités sont, eux, typiques du genre *Heliconia* sp. (Chen et Smith, 2013). Des phytolithes nommés Anisopolar présentent une morphologie avec un pôle supérieur polyédral et un pôle inférieur granuleux. Ces phytolithes sont associés aux Commelinaceae même si certaines formes pourraient indiquer, en Amérique, certaines Marantaceae (Runge, 1999 ; Eichhorn et al., 2010). Enfin, une forme prismatique, nommée Prism, avec des bords plus ou moins recourbés, présente un pied plus ou moins épais. Ces formes sont associées à des herbes Commelinaceae (Eichhorn et al., 2010).

Une des formes typiques de phytolithes dans les assemblages présente une morphologie en éventail qui lui donne son nom, *Bulliform flabulate*. Bien marqués par un corps plutôt courbé qui se termine en une tige étranglée, ces phytolithes sont majoritairement formés dans les feuilles d'herbes monocotylédones (Piperno, 2006 ; Gu et al., 2013).

Enfin, les phytolithes peuvent présenter des morphologies polygonales, rectangulaire à allongée, nommées respectivement *Blocky* et *Elongate*. Ces formes peuvent avoir une ornementation ou des processus assez diversifiés. Toutefois, ils sont présents dans la plupart des plantes terrestres et apportent peu d'information taxonomique. Ils sont, cependant, inclus dans les comptages dans le cadre d'une approche de modélisation écologique par des indices (comprendre ici des rapports de morphotypes).

Enfin, hors de cette classification mais intégrés aux comptages généraux de particules, nous avons les spicules d'éponges et les diatomées qui peuvent nous apporter une information complémentaire sur les environnements humides.

Un comptage de phytolithes est considéré comme statistiquement représentatif à partir du moment où il atteint 200 formes diagnostiques (Strömberg, 2009 ; Zurro, 2018). Au sein du comptage des phytolithes, nous dénombrons, également, le nombre de phytolithes brûlés. En effet, les phytolithes peuvent enregistrer les signaux de feux par leur changement de couleur au cours de leur carbonisation (Parr, 2006). Leur dénombrement pourrait nous apporter un signal supplémentaire sur les pratiques de brûlis dans les assemblages de phytolithes.

III. Botanique et pratiques agricoles contemporaines

1. Enquête sur l'historicité des pratiques agricoles des parcelles.

i). Homogénéité sociale des entretiens

Les 10 cultivateurs *uaxactuneros* ont participé à un entretien d'environ 1 heure à propos de leurs parcelles que nous avons étudiées. Un questionnaire, constitué de quatre axes principaux, visait à collecter des informations concernant le paysan et sa famille, les informations foncières du parcellaire, l'historicité des parcelles et enfin la diversité des pratiques agraires.

A l'exception d'un des *uaxactuneros* interrogés, tous exercent leur activité de cultivateur depuis qu'ils sont en âge d'y participer. Aujourd'hui âgés entre 30 et 60 ans, la plupart ont une expérience agricole longue de plusieurs décennies. En dehors des emplois ponctuels et saisonniers (OMYC, projets archéologiques), ils décrivent leur activité agricole comme à temps plein. Toutefois, lors de notre rencontre en 2016 à Naachtun, Enecon Oxlaj, notre guide-forestier, s'est d'abord présenté à nous comme *xateros*, c'est-à-dire cueilleur de *xate* (*Chamaedorea* sp.). Il est possible que l'agriculture vivrière soit perçue comme une activité à plein temps en raison du fait qu'elle se pratique en toute saison de l'année. Si certains possèdent quelques arbres fruitiers à proximité directe de leur foyer, tous cultivent leurs parcelles situées entre 30 minutes et 2 heures de marche. Enfin, concernant les parcellaire des cultivateurs, tous restent de taille modeste (inférieure à 4 Ha) et se composent de plusieurs parcelles attenantes.

ii). Principaux types de pratiques observées

Au cours de l'exploration des parcelles, nous avons pu étudier l'organisation spatiale des pratiques agricoles menées par les cultivateurs *uaxactuneros*. Comme étudié par Litow et al., (2001), l'ensemble des cultivateurs nous a montré l'emplacement d'une *milpa* ancienne, actuelle ou futur. La *milpa* correspond à l'agriculture vivrière principale, c'est-à-dire au type d'agriculture qui va produire les calories journalières nécessaires au foyer (PI 4.1d).

En général, une parcelle de *milpa*, qui vient d'être récoltée ou va être récoltée au mois d'avril, juste avant les pluies, est entourée par plusieurs autres types de parcelles attenantes qui chacune présente une activité ou un stade différent. Ainsi, on trouve des parcelles avec de la végétation haute fraîchement coupée, dit abattis, qui correspond à l'abattage d'une zone de forêt (PI 4.1a) ou de jachère longue (PI 4.1f). Sur une parcelle en abattis, des arbres peuvent avoir un intérêt agricole (fruit, repousse), pratique (ombrage) ou économique (marché du bois) et sont généralement conservés. Ces parcelles d'abattis sont, en général, mises à sécher pendant quelques semaines avant d'y mettre feu, donnant ainsi une parcelle dite de brûlis (PI 4.1c). Cette pratique a pour but de transférer la matière organique qui est conservée par la canopée vers les sols qui en sont pauvres (Puig, 2001). Les plantations se font à l'aide d'un bâton à fouir directement sur la parcelle brûlée.

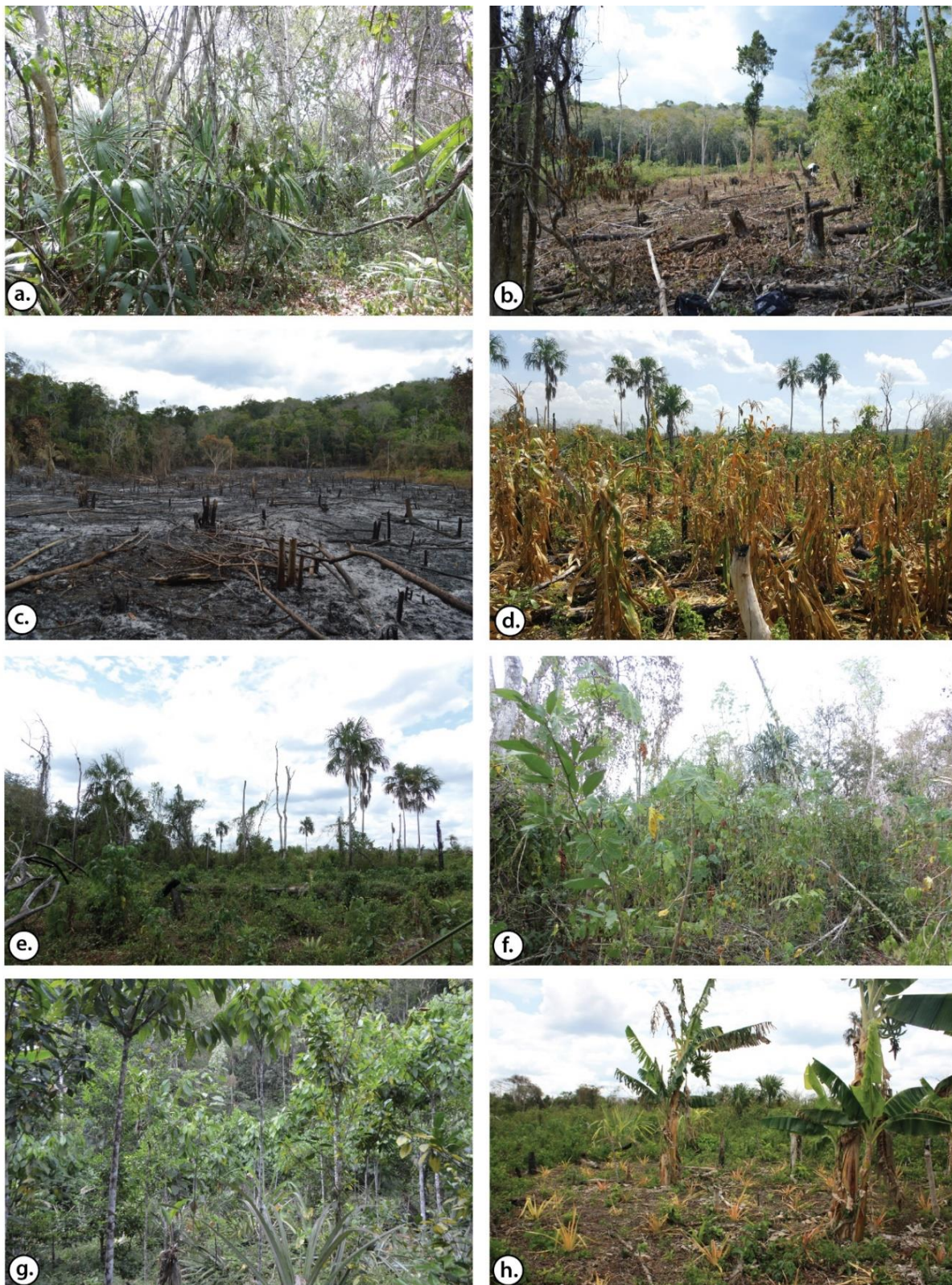


Planche 4.1 : Photographie des différents paysages agricoles de Uaxactún – a. Forêt basse de type Escobal à proximité du parcellaire d'Enecon Oxaj (Parc. C), b. Forêt de type Manchichal récemment coupée pour brûler et ouvrir une parcelle (P10), c. Parcelle récemment brûlée pour plantation d'une *milpa* (P14), d. *Milpa* récente de maïs et de cucurbitaceae (P04), e. Jachère d'un an après culture d'une *milpa* (P18), f. Jachère de 8 ans à proximité d'une *aguada* (P06), g. Forêt-jardin de cacaoyers et d'orangers (P12), h. Jardin cultivé sur un parcellaire de *milpa* (P24). © Photo projet PAYAMA – avril 2017.

Les *milpas* sont également attenantes à des zones de repousse qui prennent la fonction de jachère du fait de la pauvreté des sols en matière organique. Ces zones de jachères se présentent sous des formes allant d'associations végétales dispersées assez ouvertes (PI 4.1e) à des zones végétales très fermées (PI 4.1f) prenant parfois la structure d'une forêt. Un dernier type de parcelles rencontrées correspond aux zones de jardins. Ces jardins peuvent être intégrés à un parcellaire de *milpa* et forment alors une parcelle pérenne (PI 4.1h). Certains jardins entretenus sont composés d'arbres fruitiers sélectionnés et sont de vraies forêts-jardins (PI 4.1g).

iii). Stabilité temporelle des pratiques agricoles.

A l'exception d'une parcelle où l'historique ne remonte qu'à dix ans, en moyenne, l'historique des parcelles permet de remonter à 25 ans de pratiques agricoles et pour certaines, à plus de 50 ans. Ce qui ressort de ces historiques, c'est une homogénéité dans la temporalité des pratiques qui s'intègre au modèle de la culture itinérante sur brûlis. Les pratiques s'intègrent aussi dans différents cycles temporels : un cycle annuel lié aux conditions climatiques et un cycle plus long en lien avec la productivité des sols.

Dans le cas des cultivateurs qui pratiquent la *milpa* ou allaient en planter une, la période des brûlis (Fig 4.4₃) se fait juste avant la saison des pluies, c'est-à-dire d'avril à mai et les plantations se font en général dans la foulée. Sur une année, les cultivateurs peuvent effectuer jusqu'à deux récoltes pour le maïs. Un cycle plus long détermine la présence de jachères et la réalisation des brûlis. Chez les cultivateurs interrogés, l'agriculture de *milpa* (Fig 4.4₄) sur une parcelle dure deux ans pour les deux tiers d'entre eux et moins chez les 3 autres. Après cette phase de culture vivrière, la parcelle est mise au repos sous la forme d'une jachère (Fig 4.4_{7a}). Leur durée avant une nouvelle culture peut être courte, des cycles de 2 à 4 ans, ou organisée sur des temps plus longs, entre 8 et 20 ans (Fig 4.4_{7b}). Le cycle de jachères dépend souvent du nombre de *milpa* réalisées sur les dernières années. Les abattis-brûlis ont lieu à la fin des périodes de jachères ou lors de l'ouverture d'une parcelle dans la forêt.

Ce cycle, propre à une parcelle, s'organise en décalé sur un parcellaire. Ainsi, sur les quelques hectares comptés localement en *manzanas* (une *manzana* = 0,7 hectare), il va souvent être possible de voir une *milpa*, un brûlis, une jachère courte et une jachère longue proche d'une forêt secondaire sur le même parcellaire. Une parcelle plus pérenne est réservée à la culture horticole, sous la forme d'un jardin-potager (Fig 4.4₈).

2. L'agriculture dans la forêt

i). Insertion des parcelles dans les domaines botaniques

Comme cela a déjà été présenté, les parcelles sont réparties sur des altitudes de 100 à 300 mètres et sur des environnements sédimentaires caractéristiques de collines et de *bajo*. Le territoire de

Uaxactún forme ainsi une zone de transition écologique où les assemblages végétaux vont fluctuer en fonction des habitats, des sols et du gradient altitudinal.

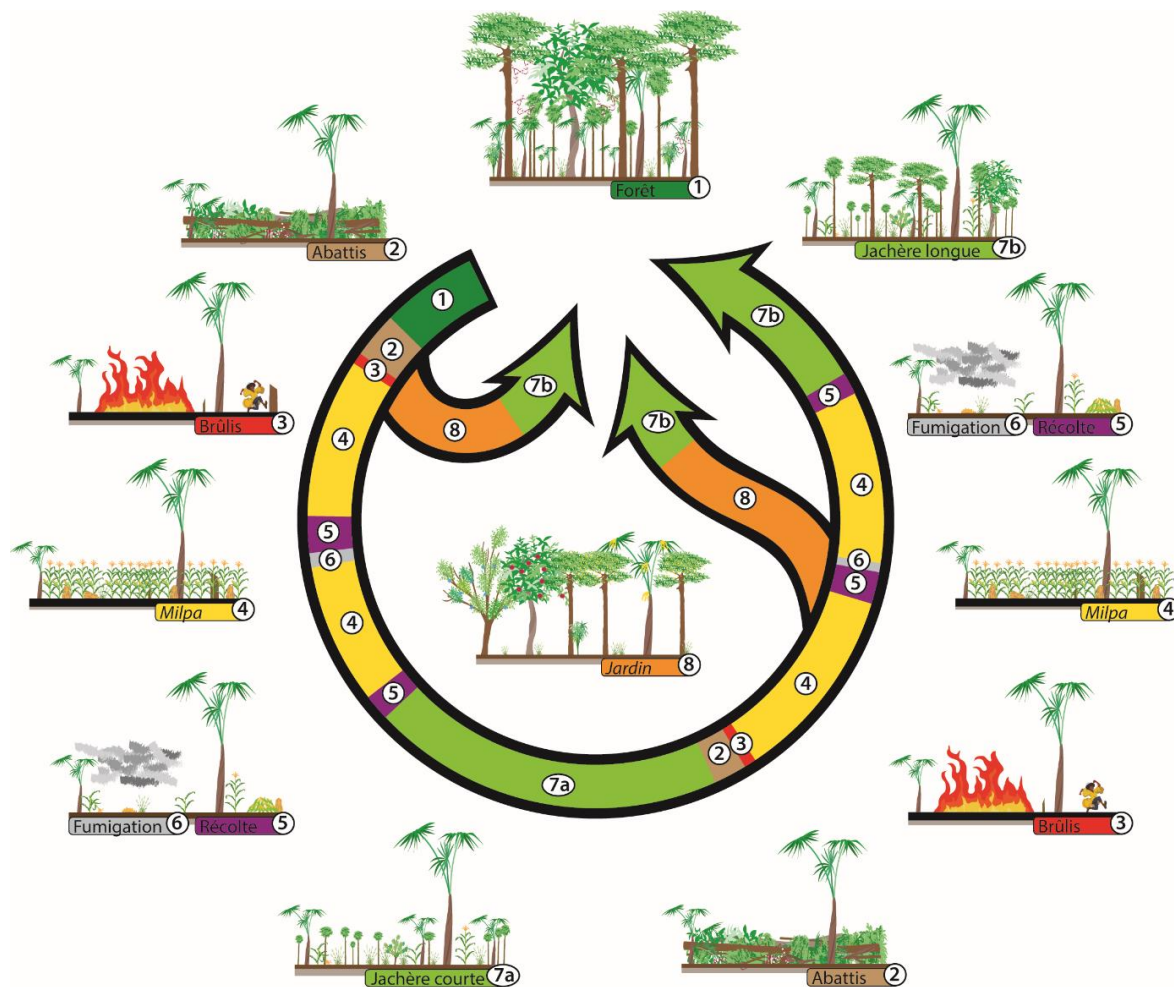


Figure 4.4 : Représentation des cycles de cultures à l'échelle d'une parcelle dans le cadre de l'agriculture de milpa et de la pratique de l'abattis-brûlis.

Afin de pouvoir prendre en compte l'impact de la végétation avant la mise en culture des parcelles dans l'enregistrement phytolithique des pratiques agricoles, nous avons mené une étude botanique des parcelles. Celle-ci consiste en un relevé des plantes cultivées, des plantes entretenues, des plantes rudérales et des plantes présentes dans les milieux non-anthropisés. Ce sont ces dernières que nous avons utilisées pour déterminer le domaine botanique originel du parcellaire en recoupant avec les espèces d'arbres et arbustes déjà présents à Naachtun. Pour cela, nous avons réalisé un relevé botanique présentiel de ces espèces dans l'espace des parcelles.

Un souci intervient dans cette méthode, tant pour l'étude des *milpas* que pour l'étude des jachères. Si l'étude des plantes actuelles nous permet d'interpréter le signal phytolithique, cela détériore notre capacité à reconstruire les domaines botaniques. En effet, dans le cas des *milpas*, les arbres et arbustes résiduels des parcelles ont été sélectionnés pour leur intérêt (fruit, ombre, bois, feuille, etc.). C'est notamment le cas de grands palmiers du genre *Sabal* sp. (**BotanBotan**), le **Pixoy** (*Guazuma ulmifolia*) ou encore le **Manchich'** (*Lonchocarpus castilloi*).

Parcelle	Par. Phyto	Sondage	Cultivars	Plantes
A Don Jorge Xxx	P01; P02		Calabaza (<i>Cucurbita</i> sp.) Frijol (<i>Phaseolus</i> sp.) Maiz (<i>Zea mays</i>) Escana (<i>Saccharum</i> sp.) Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>)	Non Relevé
B Don Jorge Guera	P03		Calabaza (<i>Cucurbita</i> sp.) Maiz (<i>Zea mays</i>) Ocoro (<i>Abelmoschus esculentus</i>) Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) Tomatillo (<i>Physalis alkekengi</i>) Cardosanto (<i>Cirsium mexicanum</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Guano (<i>Sabal mexicanum</i>) Jobo (<i>Spondias mombin</i>) Papaya Monte (<i>Vasconcellea ca.</i>) Pixoy (<i>Guazuma ulmifolia</i>) Salada (<i>Hyptis cruciformis</i>) Subin (<i>Acacia cornigera</i>) Yerbabuena (<i>Mentha x piperita</i>) Yerba mora (<i>Solan. americanum</i>) Zacate (<i>Cyperus ochraceus</i>)	
C Don Enecon Oxla	P04; P05; P06; P18; P24	S01; S06	Calabaza (<i>Cucurbita</i> sp.) Maiz (<i>Zea mays</i>) Escana (<i>Saccharum</i> sp.) Piña (<i>Ananas comosus</i>) Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Escobo (<i>Cryosophila staurac.</i>) Flor de campana (<i>Cobaea pach.</i>) Guano (<i>Sabal mexicanum</i>) Papaya Monte (<i>Vasconcellea ca.</i>) Sapotillo (<i>Guazuma ulmifolia</i>) Subin (<i>Acacia cornigera</i>) Tamay (<i>Zuelania guidonia</i>) Yasnic (<i>Vitex guameri</i>) Yerbabuena (<i>Mentha x piperita</i>) Zacate (<i>Rhynchospora corymb.</i>)	
D Don Francisco Choc	P07	S02	Frijol (<i>Phaseolus</i> sp.) Maiz (<i>Zea mays</i>) Aceituno (<i>Hamelia americana</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Flor de campana (<i>Cobaea pach.</i>) Granadilla (<i>Passiflora foetida</i>) Manchich (<i>Lonchocarpus castil.</i>) Testap (<i>Guettarda combsii</i>) Tres puntas (<i>Neurolaena lobata</i>) Zacate katkin (<i>Poaceae ?</i>) Zikiya (<i>Chrysophyllum olivifor.</i>)	
E Don Alfredo Pop	P08; P09	S03	Coco (<i>Cocos nucifera</i>) Macal (<i>Dioscorea alata</i>) Maiz (<i>Zea mays</i>) Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>) Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Cordoncillo (<i>Piper psilorrhachis</i>) Guarumo (<i>Cecropia obtusifolia</i>) Huevo de chuchó (?) Pixoy (<i>Guazuma ulmifolia</i>) Zacate (<i>Rhynchospora corymb.</i>) Zacate (<i>Panicum bartlettii</i>)	
F Don Marcus Pop	P10		Aceituno (<i>Hamelia americana</i>) Cordoncillo (<i>Piper psilorrhachis</i>) Escobo (<i>Cryosophila staurac.</i>) Guano (<i>Sabal mexicanum</i>) Jobo (<i>Spondias mombin</i>) Manchich (<i>Lonchocarpus castil.</i>) Monoelion (<i>Dendropanax arbo.</i>) Ramon (<i>Brosimum alicastrum</i>) Tamay (<i>Zuelania guidonia</i>) Yasnic (<i>Vitex guameri</i>)	
G Don Francisco Pop	P11; P12; P13	S04	Cacao (<i>Theobroma cacao</i>) Macal (<i>Dioscorea alata</i>) Naranja (<i>Citrus</i> sp.) Nance (<i>Byrsonima crassifolia</i>) Piña (<i>Ananas comosus</i>) Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>) Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) Xate pescado (<i>Chamaedorea et.</i>) Cispaz (<i>Pteridium caudatum</i>) Corozo (<i>Attalea cohune</i>) Manchich (<i>Lonchocarpus castil.</i>) Testap (<i>Guettarda combsii</i>) Tres puntas (<i>Neurolaena lobata</i>) Xate (<i>Chamaedorea oblongata</i>) Yerbabuena (<i>Mentha x piperita</i>) Zacate (<i>Rhynchospora corymb.</i>)	
H Don Edison Pop	P14; P15; P16; P17	S05	Aguacate (<i>Persea americana</i>) Izote (<i>Yucca gigantea</i>) Pimienta (<i>Pimenta dioica</i>) Zap. Manney (<i>Pouteria sapota</i>) Chicozapote (<i>Hirtella americana</i>) Cispaz (<i>Pteridium caudatum</i>) Coco (<i>Cocos nucifera</i>) Cordoncillo (<i>Piper psilorrhachis</i>) Escobo (<i>Cryosophila staurac.</i>) Guatope (<i>Inga vera</i> subsp. <i>spuria</i>) Guayavillo (<i>Eugenia</i> sp.) Navajuela (<i>Scleria secans</i>) Siricote (<i>Cordia dodescandra</i>) Yerbabuena (<i>Mentha x piperita</i>) Zacate mielado (<i>Poaceae ?</i>)	
I Don Giovanni Benites Hernandez	P19; P20; P21; P22; P23	S07	Camote (<i>Ipomoea batatas</i>) Escana (<i>Saccharum</i> sp.) Macal (<i>Dioscorea alata</i>) Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>) Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Cordoncillo (<i>Piper psilorrhachis</i>) Escobo (<i>Cryosophila staurac.</i>) Guano (<i>Sabal mexicanum</i>) Guarumo (<i>Cecropia obtusifolia</i>) Huevo de chuchó (?) Jabin (<i>Piscidia piscipula</i>) Ramon col. (<i>Trophis racemosa</i>) Salada (<i>Hyptis cruciformis</i>) Yasnic (<i>Vitex guameri</i>) Zacate mosote (<i>Cenchrus brow.</i>)	
J Don Toribio	P26; P27; P28	S08	Frijol (<i>Phaseolus</i> sp.) Maiz (<i>Zea mays</i>) Papaya (<i>Carica papaya</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Cordoncillo (<i>Piper psilorrhachis</i>) Granadilla (<i>Passiflora foetida</i>) Manchich (<i>Lonchocarpus castil.</i>) Palo Guano (<i>Lonchocarpus gu.</i>) Papaya M. (<i>Vasconcellea ca.</i>) Salada (<i>Hyptis cruciformis</i>) Tres puntas (<i>Neurolaena lobata</i>) Testap (<i>Guettarda combsii</i>) Zapotillo (<i>Pouteria</i> , sp.) Zikiya (<i>Chrysophyllum olivifor.</i>)	
K Uaxactun	P29; P30; P31; P32		Macal (<i>Dioscorea alata</i>) Chichipin (<i>Hamelia patens</i>) Guarumo (<i>Cecropia obtusifolia</i>) Huevo chuchó (?) Ixcoch (<i>Ricinus communis</i>) Palo jicote (<i>Bursera simaruba</i>) Pimienta (<i>Pimenta dioica</i>) Pixoy (<i>Guazuma ulmifolia</i>) Subin (<i>Acacia cornigera</i>) Tres puntas (<i>Neurolaena lobata</i>) Yerbabuena (<i>Mentha x piperita</i>)	

- Légendes :
- Parcels : Milpa, Jardin / Verger, Zone Rudérale, Jachère / Forêt, Sondage pédologique
 - Plantes : Arbre ligneux (> 10 m), Arbuste ligneux (< 10 m), Dicots non-ligneux, Monocots arborés, Monocots herbacés
 - Historique : Milpa, Jachère, Forêt, Jardin, Non-référence, Brûlis

Tableau 4.2 : Description des parcelles étudiées par paysans, des cultivars et espèces végétales présents sur les parcelles, et de l'historicité d'une parcelle choisie.

Dans le cadre des jachères, il s'agit d'arbres qui repoussent rapidement, plutôt héliophiles, comme le **Guarumo** (*Cecropia obtusifolia*), le **Subin** (*Acacia cornigera*), le **Testap** (*Guettarda combsii*). En choisissant d'étudier les espèces des parcelles, on va donc signer l'état actuel de la parcelle et non son intégration dans un écosystème végétal particulier. Nous aurions pu

étudier les espèces végétales des forêts attenantes aux parcelles pour mieux intégrer les parcelles à ces domaines botaniques.

Pour pallier cet inconvénient, deux forêts, situées à proximité des parcellaires C et F, ont été étudiées afin de permettre d'aborder, tout de même, l'origine botanique des parcelles (Tab 4.2). Les assemblages botaniques de la forêt à proximité des parcelles d'Enecon Oxlej (parcellaire C) sont dominés par les palmiers de sous-bois **Escobal** (*Cryosophila stauracantha*) et **Guano** (*Sabal mexicanum*). Cette forêt basse est également riche en petits arbres appartenant au Fabaceae comme **Arozillo** (non-identifié), **Catche toro** (non-identifié), **Subin** (*Acacia cornigera*) et en autres arbustes comme le **Cuero de sapo** (non-identifié). Ces espèces sont caractéristiques des environnements végétaux de *bajo* et sont également présentes dans les *bajo* de Naachtun. On note, en revanche, la présence du **Cordoncillo** (*Piper psilorhachis*), plutôt présent dans les sous-bois de forêt haute à Naachtun. Cette forêt du nord-est de Uaxactún correspondrait plutôt à une forêt de transition entre les environnements de collines et de *bajo*, une forêt basse riche en Arecaceae, de type *sabal* ou *escobal* (Lundell, 1937 ; Schulze et Whitacre, 1999).

La seconde portion de forêt correspond à une parcelle de forêt fraîchement coupée par Don Marcus Pop (Parcellaire F) au sud-ouest du polygone agricole de Uaxactún, sur une zone de colline. Cette forêt est dominée par le **Manchich'** (*Lonchocarpus castilloi*), un arbre haut de la famille des Fabaceae. Peu présent à Naachtun, cette espèce pousse majoritairement dans les forêts hautes (Lundell, 1937) qui peuvent parfois prendre la forme d'une forêt *manchichal* (Martinez et Gallindo-Leal, 2002). D'autres arbres ont également été retrouvés dans les forêts hautes des collines de Naachtun comme le **Ramon** (*Brosimum alicastrum*), le **Jabin** (*Piscidia piscipula*), le **Jobo** (*Spondias mombin*) ou encore le **Cordoncillo** et dont certains ont été trouvés en association avec le **Manchich'** dans les forêts de Calakmul (Martinez et Gallindo-Leal, 2002). Les palmiers **Escobo** et **Guano** sont aussi présents dans l'assemblage végétal et composent en grande partie le sous-bois de ces forêts. Cette forêt haute nous montre que le sud-ouest de Uaxactún est couvert par des forêts de collines en lien avec la partie ouest de l'escarpement *Buenavista*. Toutefois, la présence de palmiers indique également la proximité des zones de transitions palmières des bas de pente et du *bajo*.

Sur la base de ces forêts étudiées aux extrêmes altitudinales de Uaxactún, on peut considérer que le territoire est couvert par un assemblage botanique correspondant aux forêts de transition, caractéristiques du Petén, c'est-à-dire riches en palmiers et en espèces typiques des domaines d'altitudes de collines ou de *bajo*.

ii). Associations rudérales et cultivars

Les pratiques agricoles menées sur les parcelles et les dynamiques écologiques déterminent les espèces végétales observées sur celles-ci pendant notre étude. La végétation sur ces parcelles a été étudiée sous trois de ces composantes que sont les cultivars, les plantes sélectionnées dans les cultures, les rudérales, des plantes associées aux pratiques agricoles mais qui ne

sont pas plantées et les plantes de végétation de forêt de climax ou de forêts secondaires qui auraient été sélectionnées ou auraient repoussé pendant la culture de la parcelle (Tab 4.2).

a). Dans la *milpa*

Parmi les cultivars, on peut différencier les plantes annuelles et cultivées des plantes entretenues. Les plantes annuelles cultivées font généralement partie de la *milpa*. Bien entendu, le **maïs** (*Zea mays* – Pl 4.2a-b) est la plante cultivée dans toutes les *milpas* étudiées. Sur certaines parcelles, les courges (*Cucurbita sp.* – Pl 4.2 e-f) ou les **frijoles** (*Phaseolus vulgaris* – Pl 4.2c-d) sont cultivés en association avec le maïs. Le mutualisme des trois sœurs, souvent présenté comme idéal de pratique agroécologique (Landon, 2008), ne semble pas être appliqué automatiquement, ni répondre à une contrainte pédologique. Ainsi, sur les mêmes terres de *bajo*, des parcelles de *milpa* vont présenter de la culture de maïs simple, de la culture avec des courges et **Ocoro** (*Abelmoschus esculentus* – Pl 4.2h) ou simplement avec des courges ou des haricots. Cette diversité dans les associations des plantes annuelles se retrouve aussi dans les parcelles des niveaux de collines avec la culture de maïs en association avec des courges et/ou des haricots. D'autres plantes annuelles peuvent également pousser dans la *milpa*, comme la **Tomate** (*Solanum lycopersicum* – Pl 4.2j) et la **tomatille** (*Physalis alkekengi* – Pl 4.2l).

b). Dans les jardins

Les autres cultivars se retrouvent plutôt dans les parcelles de jardin où des plantes entretenues et/ou annuelles vont fournir d'autres sources de nourriture (Tab 4.2). Ces plantes entretenues peuvent prendre la forme de grands arbres anciennement sélectionnés et aujourd'hui conservés comme le **Cacao** (*Theobroma cacao* – Pl 4.2o), le **Zapote mamey** (*Pouteria sapota*), l'**Aguacate** (*Persea americana*), le **Naranja** (*Citrus sp.*), le **Nance** (*Byrsonima crassifolia*), le **Tamarin** (*Tamarindus indica*) ou encore le **Papaya** (*Carica papaya*). Des plantes non-ligneuses et semi-permanentes sont également cultivées comme la **Piña** (*Ananas comosus* – Pl 4.2g), la banane (*Musa sp.* – Pl 4.2n) ou le xate queue de poisson (*Chamaedorea ernesti-augusti*). Des plantes annuelles se retrouvent également dans les jardins, principalement sous la forme de tubercules et de racines, comme c'est le cas pour le **Yucca** (*Manihot esculenta* – Pl 4.2i), le **Macal** (*Dioscorea alata* – Pl 4.2m) et le **Camote** (*Ipomoea batatas* – Pl 4.2k) ou de plantes herbacées comme la canne à sucre (*Saccharum sp.* – Pl 4.2p). Cette diversité de cultivars montre les différentes adaptations agricoles pour subvenir aux besoins des cultivateurs.

c). Plantes ubiquistes

Dans notre travail de collecte des plantes des parcelles, nous avons également trouvé de nombreuses plantes associées aux pratiques agricoles, aux parcelles anciennement cultivées ou aux environnements soumis à une anthropisation.

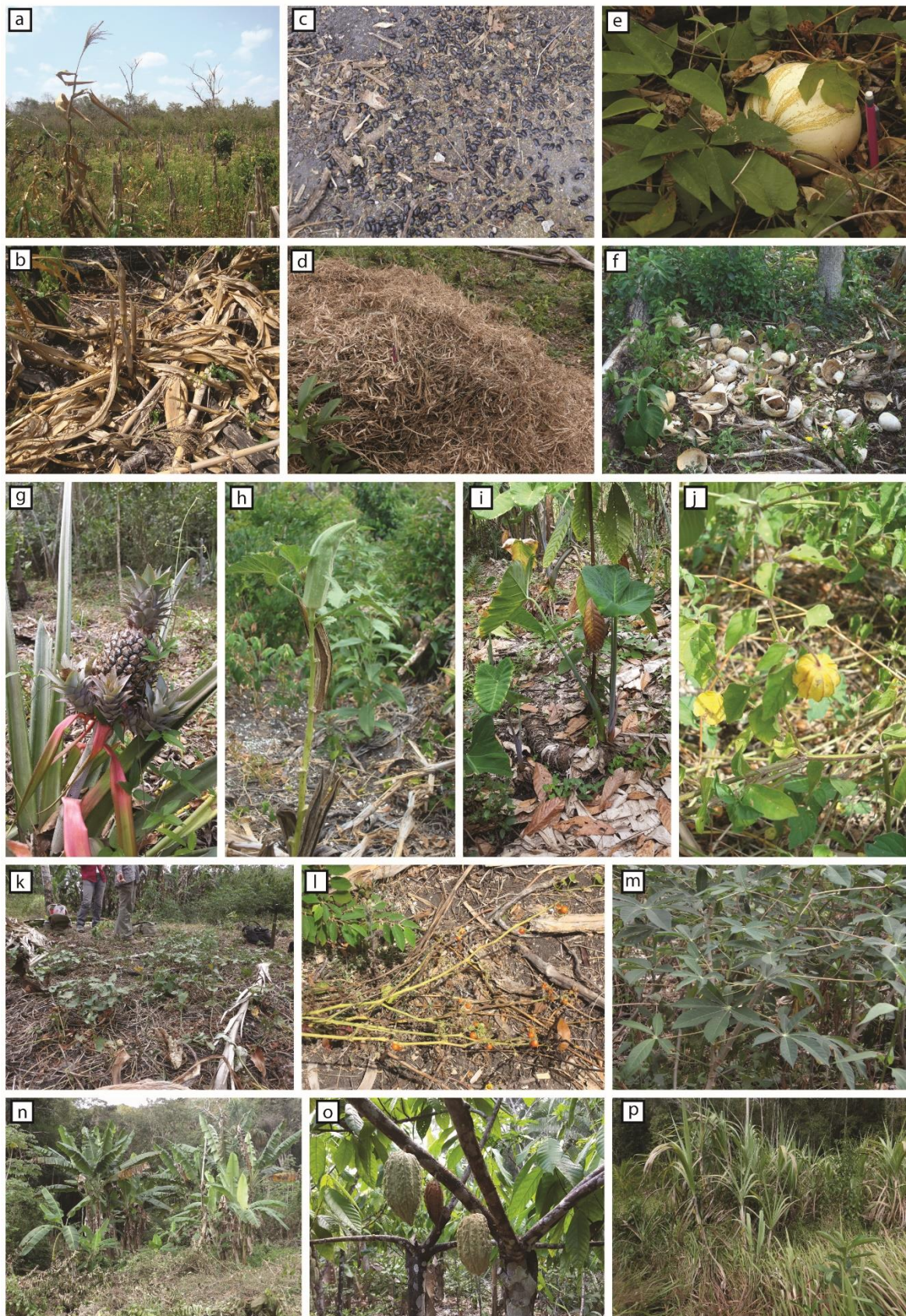


Planche 4.2 : Illustration de cultivars croisés dans les parcelles de Uaxactún. a-b : **Maïs** *Zea mays* ; c-d : **Frijol** *Phaseolus vulgaris* ; e-f : **Pepitoria** *Cucurbita* sp. ; g : **Pina** *Ananas comosus* ; h : **Ocoro** *Abelmoschus esculentus* ; i : **Yucca** *Manihot esculenta* ; j : **Tomatille** *Physalis alkekengi* ; k : **Camote** *Ipomoea batatas* ; l = **Tomate** *Solanum lycopersicum* ; m : **Macal** *Dioscorea alata* ; n : **Platano** *Musa* sp. ; o : **Cacao** *Theobroma cacao* ; p : **Escana** *Saccharum officinarum*

Ces plantes, qualifiées de rudérales, sont absentes des zones non-anthropisées actuelles de Naachtun mais aussi des zones de forêts non-cultivées de Uaxactún. Le **Chichipin** (*Hamelia patens*) est une plante rudérale par excellence puisqu'on la trouve sur toutes les parcelles, excepté le jardin entretenu de Francisco Pop (Parcelle G) et la forêt coupée de Marcus Pop (Parcelle F). Si le Chichipin n'est pas cultivé, il semble que sa pousse soit favorisée en raison de l'intérêt médical et dermatologique des feuilles, fleurs et racines de la plante. D'autres plantes rudérales ont également un intérêt médical comme le **Tres puntos** (*Neurolaena lobata*) pour la fièvre, les diarrhées et les morsures de vipères.

La pratique de l'abattis et de la mise en jachère va favoriser, dans un premier temps, la repousse de plantes rudérales dont les plantes médicinales et herbacées, au détriment des plantes pionnières ligneuses (Ferguson et al., 2003). Ainsi, au contraire des forêts du Petén, nous avons trouvé de nombreuses rudérales, dicotylédones non-ligneuses et herbacées, qui ne sont pas utilisées par les *uaxactuneros* mais forment une composante importante de la végétation des parcelles. Certaines peuvent prendre la forme de vignes comme la **Flor de campana** (*Cobaea pachysepala*) ou la **Granadilla** (*Passiflora foetida*), de fleurs sur tige comme la **Salada** (*Hyptis cruciformis*), le **Cardosanto** (*Cirsium mexicanum*) ou la **Yerbabuena** (*Mentha x piperita*), de fougères comme le **Cizpaz** (*Pteridium caudatum*) ou des herbacées connues sous le nom général de **Zacate** (*Cenchrus brownii*, *Cyperus ochraceus*, *Panicum bartlettii*, *Rhynchospora corymbosa*) qui regroupe autant des Poaceae que des Cyperaceae.

Finalement, cette cohorte de plantes liées aux pratiques humaines permet d'avoir un assemblage très différent des forêts environnantes. L'étude des phytolithes et l'identification de ceux produits par ces espèces pourraient permettre de différencier les parcelles cultivées et/ou anthropisées des forêts considérées comme naturelles.

IV. Résultats sur les bioindicateurs

1. Domination des morphotypes de dicotylédones ligneuses et de palmiers.

L'analyse des échantillons issus de l'ensemble des 31 parcelles étudiées a fourni des assemblages de phytolithes lisibles et riches (Tab 4.3, Fig 4.6). Mais, ces assemblages semblent très homogènes sur le diagramme et ne permettent pas, à première vue, de discriminer les pratiques agricoles.

Les morphotypes *Sclereid* sont assez peu présents. La plupart des échantillons atteignent des valeurs inférieures à 5% et une médiane à 2%. Seul l'échantillon P16 montre une concentration de *Sclereid* proche des 20 %, avec des formes majoritairement allongées et facettées.

Les morphotypes *Globular* dominent les assemblages avec une représentation minimale de 80% et une valeur médiane de 95%. Ces morphotypes « écrasent » totalement les assem-

blages de phytolithes des échantillons. Parmi ces types de formes, les *Globular mixed*, indiquant plutôt des dicotylédones ligneuses, représentent en moyenne 50% des assemblages tandis que les *Globular echinate*, produits par les palmiers, représentent en moyenne 45% des assemblages. Les autres formes de *Globular* ne dépassent pas 2% des assemblages et les grandes formes facettées diagnostiques des Cucurbitaceae sont totalement absentes des assemblages.

Les formes de Hat shape, produites également par les palmiers, sont beaucoup moins présentes que leurs homologues globulaires. Avec une représentation maximale à 6%, ces morphotypes ne sont présents que sur un tiers des échantillons avec des valeurs moyennes de 1.5%.

2. Phytolithes de Poaceae et autres monocotylédones

Les formes appartenant au Grass Silica Short Cell Phytolith (GSSCP) sont produites par des herbes Poaceae. Les différents morphotypes comme les *Lobate*, les *Saddle* et les *Rondel* sont très peu représentés dans notre diagramme. Aucun morphotype ne dépasse 4% et la somme de l'ensemble des formes ne dépasse 5% que pour les échantillons de 3 parcelles de jardins que sont P08, P11 et P12 (Tab 4.3 ; Fig 4.5). En moyenne, l'ensemble des GSSCP ne représente que 2,5% des assemblages. Les phytolithes de GSSCP caractéristiques du maïs, avec un seul phytolithe compté dans tous les assemblages, sont absents (Tab 4.3 ; Fig 4.5).

Les morphotypes de *Papillae* sont également assez rares avec seulement 5 échantillons qui en contiennent. A l'exception des parcelles de jardin P08 et P09, seules des parcelles à proximité d'une *aguada* ou des échantillons d'*aguada* possèdent des morphotypes de Cyperaceae (P06, P17 et P32) (Tab 4.3 ; Fig 4.5). Les *Papillae* pourraient, comme à Naachtun, indiquer un environnement humide.

Des phytolithes de bananes ont également été comptés dans 5 échantillons (P08, P14, P22, P30 et P32). Le plus haut pourcentage atteint par ce morphotype est de 3,2% et les valeurs moyennes des échantillons qui en possèdent, avoisinent les 1,5%.

Tableau 4.3 – Tableau de comptages des morphotypes de phytolithes et bioindicateurs pour les parcelles de Uaxactun. (Arec. = Arecaceae ; Bioindic = bioindicateurs (spicules d'éponge, diatomées)
Elong. = Elongate ; Par. = Parrallepipedal)

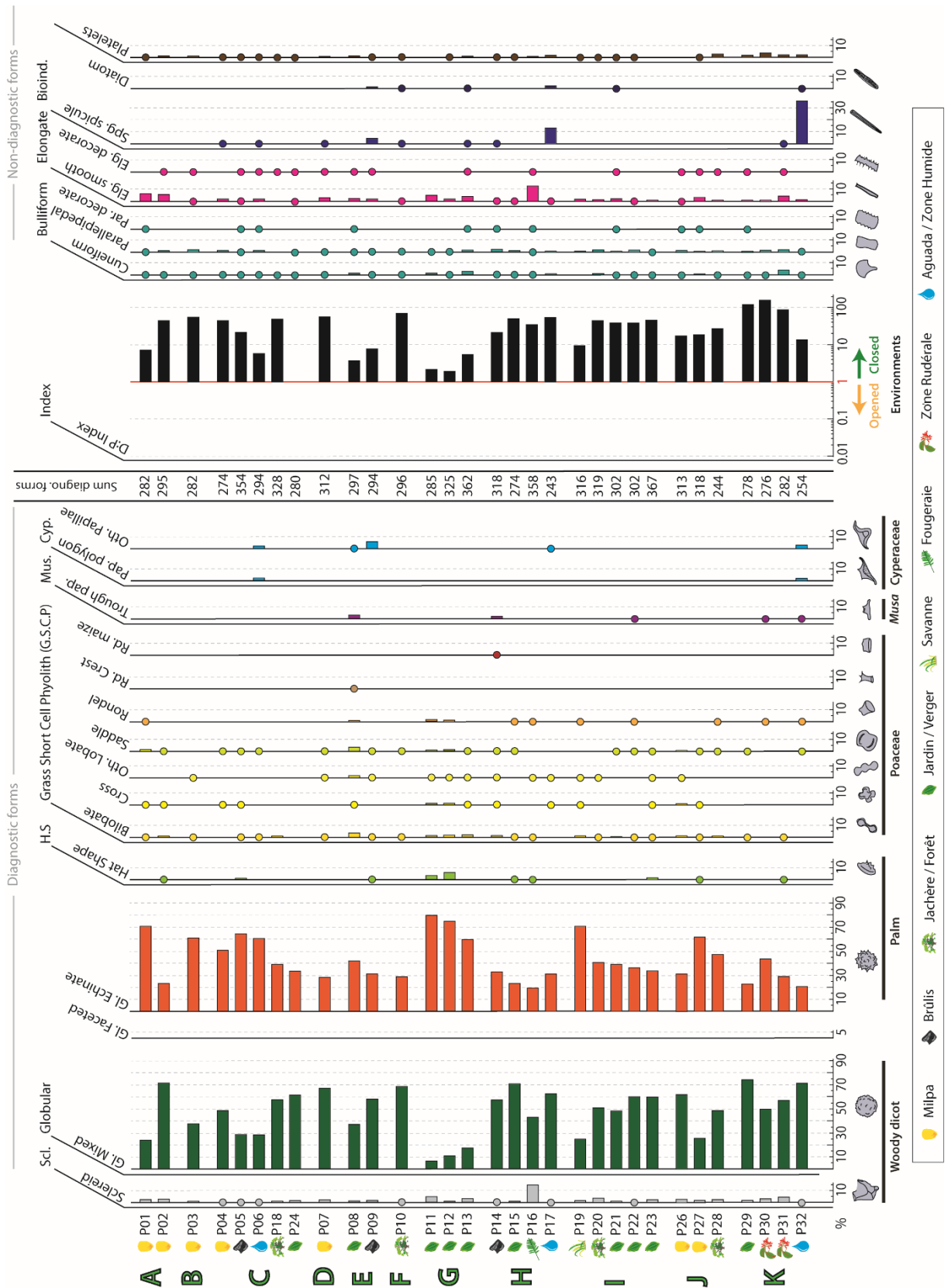


Figure 4.5 – Description des parcelles étudiées par paysans, des cultivars et espèces végétales présents sur les parcelles, et de l'historicité d'une parcelle choisie.

3. Phytolithes non-diagnostiques, Indices et Bioindicateurs.

A l'échelle du diagramme les phytolithes non-diagnostiques sont également peu représentés. Les morphotypes *Bulliform*, toutes formes cumulées, ne représentent, en moyenne, que 2% de l'ensemble des particules comptées. Seul l'échantillon P31 dépasse 5%. Pour le cumul des morphotypes *Elongate*, les résultats sont semblables avec seulement 2 échantillons dépassant 5% (P1 et P2) et un échantillon dépassant 10% (P16). A l'exception de ces trois pics de valeurs, la moyenne des *Elongate* est de 2,3% (Tab 4.3 ; Fig 4.5).

Malgré qu'un tiers des échantillons enregistrent des bioindicateurs comme les spicules d'éponges et les diatomées, leur présence est anecdotique. Pour les spicules d'éponges, la majorité des échantillons oscillent sur des valeurs de 0 à 0.5%. Toutefois, trois échantillons ont des valeurs assez fortes allant de 4,5% (P09), 13,5% (P17) à 35% (P32). Quant aux diatomées, sur les 5 échantillons qui en comptent, seul P17 dépasse les 1%, avec une valeur à 2,5% (Tab 4.3 ; Fig 4.5).

Les Platelets sont présents dans les échantillons mais ne dépassent jamais 4% des assemblages. En moyenne, les platelets représentent 1,1% des particules comptées. En ce qui concerne les phytolithes noirs opaques, ils ne représentent, en moyenne, que 1% des assemblages et ne dépassent jamais 2% (Tab. 4.3). Enfin, l'index D:P, qui calcule le taux de couverture sur la base d'un rapport entre les formes de dicotylédones et de Poaceae, expose pour 90% des échantillons des valeurs supérieures à 5. Les trois échantillons, qui présentent un indice D:P inférieur à 1, restent toutefois largement positifs avec des valeurs oscillantes entre 1,8 et 3,7. La valeur moyenne de l'indice D:P dans ce diagramme dépasse 35 et peut aller jusqu'à une valeur de 146 (P30). Il est alors visible que les assemblages de phytolithes n'enregistrent pas de milieux ouverts.

4. Regroupement d'assemblages sur la base des statistiques.

N'ayant pu identifier de patron sur l'étude du diagramme, les comptages ont été testés sous un processus statistique dans le but d'identifier des groupements. Sur la base des assemblages des phytolithes ou de la végétation initiale, il n'est pas possible de créer des regroupements a priori. J'ai donc réalisé une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) afin d'identifier des regroupements sur la base d'un indice de similarité, ces groupes étant testés a posteriori par une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

La réalisation de la CAH, sous un indice euclidien (Fig 4.6), a permis d'identifier au moins 4 regroupements d'assemblages. Toutefois, 3 échantillons n'ont pas pu y être intégrés et sont considérés comme des groupes à eux seuls. Ces sept groupes ont été testés dans une AFC pour observer leur comportement.

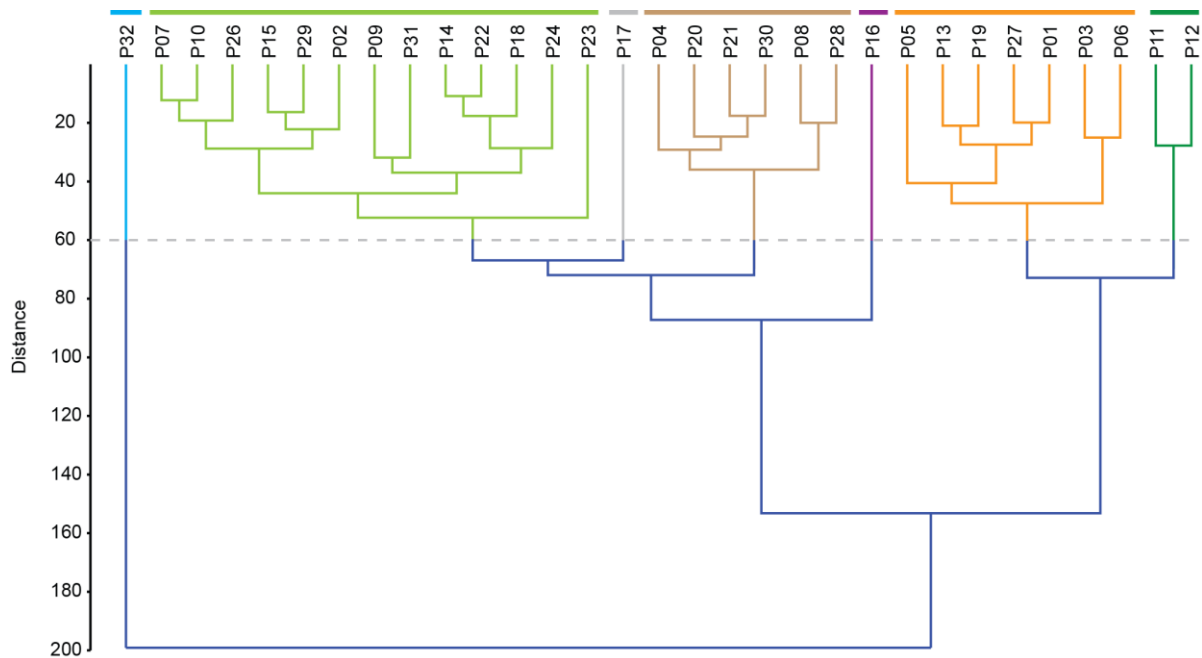


Figure 4.6 – Classification Ascendante Hiérarchique créant des regroupements par l'indice de similarité euclidien et donc la rupture à une distance de 60 crée 7 groupes, dont trois principaux.

L'AFC, correspondant au diagramme de phytolithes (Fig 4.7), nous permet de confirmer certaines observations faites sur le diagramme et également d'en mettre d'autres en évidence. Tout d'abord, la répartition des échantillons sur l'axe 1 semble répondre à un paramètre d'humidité. La partie positive de cet axe est influencée par la contribution des spicules d'éponges. Ainsi, la plupart des échantillons en étant dépourvus, ils se trouvent sur la portion négative de l'axe, elle, influencée par la contribution en *Globular echinate* (Glo5).

L'axe 2 est organisé en fonction de la richesse en morphotypes de palmier *Hat shape* (Hsh1) et *Globular echinate* (Glo5) pour la portion positive et en morphotype de *Globular mixed* (Glo1-3) pour la partie négative. L'axe 2 semble montrer une organisation successive des groupes proposés par la CAH. Ainsi, le groupe A, constitué de P11 et P12, semble être isolé des autres par la présence de morphotypes *Hat shape* (Hsh1), des fortes valeurs en *Globular echinate* (Glo5) et une faible proportion en *Globular mixed* (Glo1-3). En redescendant sur l'axe, le groupement B est constitué d'échantillons dont les pourcentages de *Globular echinate* sont toujours supérieurs à 60%. Le groupement C présente des valeurs moyennes des morphotypes *Globular mixed* et *Globular echinate*. Finalement, le groupement D est constitué d'échantillons avec de fortes valeurs de *Globular mixed*. On peut distinguer deux sous-groupes déjà présents sur la CAH, avec des échantillons proches du 0 de l'axe et des pourcentages de Glo1-3 aux alentours de 60% ainsi que des échantillons plus ancrés dans les valeurs négatives de cet axe 2 et qui présentent des valeurs de Glo1-3 aux alentours de 70%.

Le dernier axe participe moins à l'organisation du nuage de points des échantillons. Il isole l'échantillon de fougère (P16) qui a de fortes valeurs en *Sclereid* et en *Elongate*, morphotypes très peu présents dans les autres échantillons.

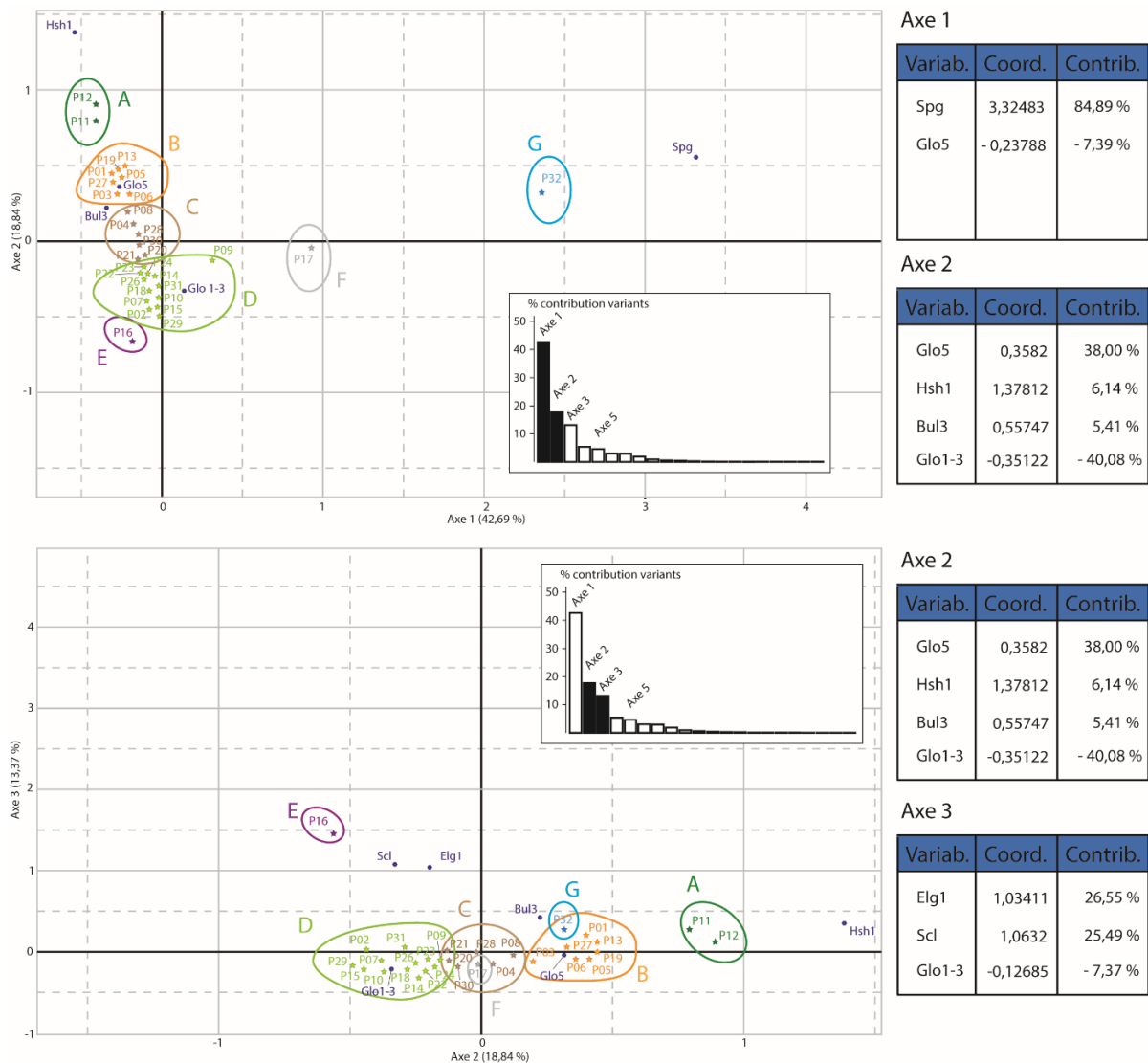


Figure 4.7 – Analyse Factorielle des Correspondances des assemblages de phytolithes. Répartition des 31 échantillons étudiés en fonction des morphotypes les plus contributeurs des axes.

Si cette analyse statistique n'a pas abouti non plus à identifier des pratiques agricoles, elle nous a permis de mettre en avant des groupements naturels des assemblages de phytolithes, organisés en fonction de leur concentration dans les deux morphotypes les plus présents, à savoir les *Globular echinate* et les *Globular mixed*. Toutefois, au vu de la dispersion des échantillons de mêmes parcelles, entre les différents groupements, il n'est pas non plus possible de traduire les groupes créés comme indicateurs des domaines botaniques pré-agricultures.

V. Caractérisation des pratiques agricoles et contexte taphonomique

1. Un mauvais enregistrement des champs cultivés

Le projet, initialement mené avec les phytolithes, était d'identifier des assemblages qui permettraient de caractériser l'ouverture du milieu par les pratiques agricoles ou du moins, de les différencier des environnements de forêts. L'objectif de cette étude était de discriminer

les types de parcelles en fonction des assemblages pour comprendre les échantillons fossiles d'anciens contextes cultivés.

La grande majorité de ces objectifs s'avèrent ne pas être résolus avec l'approche par phytolithes. Les premières observations faites et confirmées par les analyses statistiques sont que les phytolithes enregistrent des environnements de forêts, riches en palmiers là où était présente une végétation ouverte et anthropisée. Cependant, ils semblent être de meilleurs indicateurs pour les environnements particuliers tels que les milieux humides ou proches du rayon d'action d'une *aguada* et les fougeraies. En revanche, la diversité des pratiques agricoles et des cultures n'est pas enregistrée par les phytolithes.

La présence de phytolithes de Musaceae nous informe tout de même sur la possibilité de signer les environnements de jardins puisque la plante produit des phytolithes diagnostiques. Si des valeurs autour de 5% paraissent faibles, elles sont pourtant assez importantes dans le cas des Musaceae qui produisent peu (Denham et al., 2003 ; Chen et Smith, 2013 ; Chabot et al., 2018). Mais, il s'agit d'une plante introduite récemment dans les cultures centraméricaines qui n'apportera rien dans la lecture d'assemblages fossiles (Jain, 1965 ; Langhe et al., 2009).

La présence d'autres phytolithes diagnostiques comme les Cyperaceae est plus liée à la présence de points d'eau qu'associée à des pratiques agraires. Quant aux GSSCP, si certaines plantes comme la canne à sucre ou le maïs en sont productrices (Lu et Liu, 2003 ; Pearsall et al., 2003) et enregistrées dans les sols (Iriarte, 2003), elles participent très peu à la constitution des assemblages de nos échantillons. Il en est de même pour les phytolithes de courges (Piperno et al., 2000) ou de haricots (Bozarth, 1990) pourtant bien identifiés mais qui sont absents de nos assemblages. Enfin, la plupart des cultigènes trouvés dans les jardins, des tubercules comme le *yucca* et le *camote* aux grands arbres comme la papaye, le cacaotier ou l'avocatier en passant par l'ananas, sont connus pour ne pas produire de phytolithes (Piperno, 1985 ; Piperno, 2006).

De plus, rien n'indique un enregistrement des périodes de brûlis avec les phytolithes brûlés ou les platelets, au regard de leur faible représentativité.

Plusieurs questions se posent sur cette mauvaise représentation des phytolithes de maïs ou de courge et sur cette absence de signal d'ouverture des parcelles dans les assemblages. Je propose d'émettre plusieurs hypothèses sur la taphonomie et la dynamique des phytolithes pour expliquer ces résultats.

2. Hypothèses taphonomiques

La principale observation faite sur le diagramme (Fig 4.5) correspond à la dissymétrie entre les fortes proportions de formes globulaires et la quasi-absence des formes de GSSCP. Je pose

l'hypothèse que ce contraste provient de l'état de la biocénose et de la constitution de la thanatocénose plus que de phénomènes taphonomiques post-dépôts à l'intérieur des sols. En d'autres termes, la production différentielle de phytolithes, par les plantes et les cycles de végétations dans les pratiques agricoles, me semble responsable de ce contraste.

i). Production différentielle des phytolithes

La production de phytolithes par les plantes dépend de facteurs écologiques, climatiques et génétiques qui peuvent être différents d'une plante à l'autre (Carnelli et al., 2001 ; Piperno, 2006). Ainsi, chez les dicotylédones ligneuses, certaines familles produisent des phytolithes alors que d'autres non et ce différentiel est également noté chez les monocotylédones (Piperno, 2006).

Les palmiers produisent le phytolithe *Globular echinate* dans toutes les parties de la plante (Fenwick et al., 2011) et surtout en très grande quantité (Kealhofer et Piperno, 1998 ; Bamford et al., 2006). Les palmiers étudiés par Bamford et al. (2006) présentent des concentrations de 50 à 300 millions de phytolithes par gramme. Dans le même temps, les Poaceae de différentes espèces vont produire entre 2 et 150 millions de phytolithes par gramme, élargissant l'échelle de production pour ces plantes (Bamford et al., 2006). La forte production de *Globular echinate* leur permet d'être bien représentés dans les assemblages sur de longues périodes (Albert et al., 2006). Les dicotylédones ligneuses, elles, produisent relativement moins de phytolithes que les palmiers et les herbacées (Bamford et al., 2006).

Ainsi, sur la seule base de la production différentielle de phytolithes en fonction des plantes, la surproduction de palmiers est aisément explicable. En revanche, l'absence de phytolithes de Poaceae ne s'explique pas au regard des fortes proportions de *Globular* de dicotylédones ligneuses. Il faut donc lier ce différentiel de production à d'autres processus.

ii.) Biais taphonomiques ante et post dépôts.

Au même titre que les environnements dits « naturels », les phytolithes des environnements anthropisés sont soumis à des processus physico-chimiques qui peuvent perturber les assemblages au sein des sols.

D'un point de vue physique, on peut penser que les formes compactes et robustes des globulaires leur permettent de mieux résister aux transports que les GSSCP à la morphologie plus fine (Osterrieth et al., 2009). Toutefois, les environnements de forêts tropicales ne favorisent pas le déplacement éolien des phytolithes (Alexandre et al., 1997). Les zones que nous avons étudiées, étant des parcelles à topographie plane, le transport par gravité ou par l'eau a peu de chance d'avoir modifié de manière significative les assemblages.

En milieu de forêts tropicales, les dissolutions chimiques peuvent, en revanche, impacter sensiblement les assemblages (Alexandre et al., 1997). La dissolution chimique pourrait être plus importante pour les phytolithes de dicotylédones que pour les phytolithes de Poaceae en raison de leur solubilité (Bartoli et Wilding, 1980) et des grandes tailles de certaines formes (Piperno, 2006). Des conclusions inverses ont également été déduites d'analyses en laboratoire, montrant que les différents types de phytolithes sont attaqués de la même manière par la dissolution dans toutes les gammes de pH (Frayse et al., 2009).

Les processus ante et post-dépôt ne semblent pas amener d'arguments supplémentaires quant à une domination des morphotypes de globulaires sur les assemblages des sols de Uaxactún. Il est donc nécessaire d'envisager que les pratiques humaines sur les paysages pourraient influencer les assemblages de phytolithes (Madella et Lancelotti, 2012).

iii). Biais d'enregistrement dû aux cycles végétaux de la *milpa*.

La seconde partie de l'hypothèse, que je propose ici, concerne le cycle écologique de la végétation au cours de la pratique de l'abatis-brûlis à Uaxactún. Comme nous l'avons vu pendant nos enquêtes sur l'historicité des parcelles, la culture de *milpa* ne représente qu'une courte période de temps. En moyenne, pour 25 ans d'exploitation de parcelles, de forêt à forêt, la *milpa* n'est exploitée que 4 à 8 ans. Le cycle de *milpa* tel que nous l'avons présenté est identique aux pratiques agricoles de *milpa* depuis au moins le début du siècle dans la péninsule du Yucatan (Lundell, 1933 ; Levasseur et Olivier, 2000 ; Nigh et Diemont, 2013).

Comme nous l'avons vu, avant la mise en place de pratiques agricoles, les forêts sont généralement riches en *Globular mixed* et *Globular echinate* (ex : Fig 4.5 – P10). La pratique du brûlis a peu de chance de modifier l'assemblage initial phytolithique du sol de surface. Le feu peut colorer une partie de l'assemblage de surface (Parr, 2006) mais les phytolithes ne sont, en général, pas déstructurés ou détruits avant 900-1200° C (Elbaum, 2003 ; Parr, 2006), températures que n'atteignent pas les feux de forêts tropicales en Amérique centrale (Cochrane, 2010). On peut également imaginer que le brûlis enrichisse le sol de surface en morphotypes *Globular* en accélérant la décomposition des tissus végétaux de palmiers et dicotylédones ligneuses.

La culture de *milpa* se déroule sur un temps assez court, entre 6 mois et 2 ans. Pendant leur phase de croissance, les plantes annuelles comme le maïs vont intégrer le silicium pour former les phytolithes plutôt qu'en déposer dans les niveaux de sols (Jones et Handreck, 1967 ; Piperno, 2006). Les phytolithes de maïs devraient être intégrés dans le sol de surface lors de pertes de tissus, de fruits, etc. ou de la décomposition de la plante. Il est également considéré que le cycle des Poaceae étant annuel, l'apport en phytolithes GSSCP est censé être plus important que celui provenant de dicotylédones ligneuses (Albert et al., 2006). Ce paramètre est à nuancer dans notre cas. Tout d'abord, les Poaceae sont en concurrence directe avec les dicotylédones non-ligneuses dans les repousses de végétations secondaires (Fergusson et al.,

2003). Enfin, la nature des dépôts de phytolithes peut être impactée lors du prélèvement de plantes par leurs prédateurs (Albert et al., 2006). C'est tout particulièrement le cas avec le maïs où lors de la phase de récolte, la plupart des parties de la plante sont réutilisées : les céréales et fruits sont peu laissés à l'abandon, les tiges du maïs peuvent être utilisées comme tuteur. Dans le cas des courges, seuls les fruits produisent des phytolithes (Bozarth, 1987 ; Piperno, 2009), or très peu de Calebasses sont abandonnées sur les parcelles ou alors entassées dans une seule zone (Pl 4.2 – f). On l'a vu, la plupart des autres cultigènes ne produisent pas de phytolithes (Piperno, 2006). Ainsi, sur certaines parcelles, la matière végétale disponible pour produire des phytolithes témoins de cette ouverture du milieu est faible.

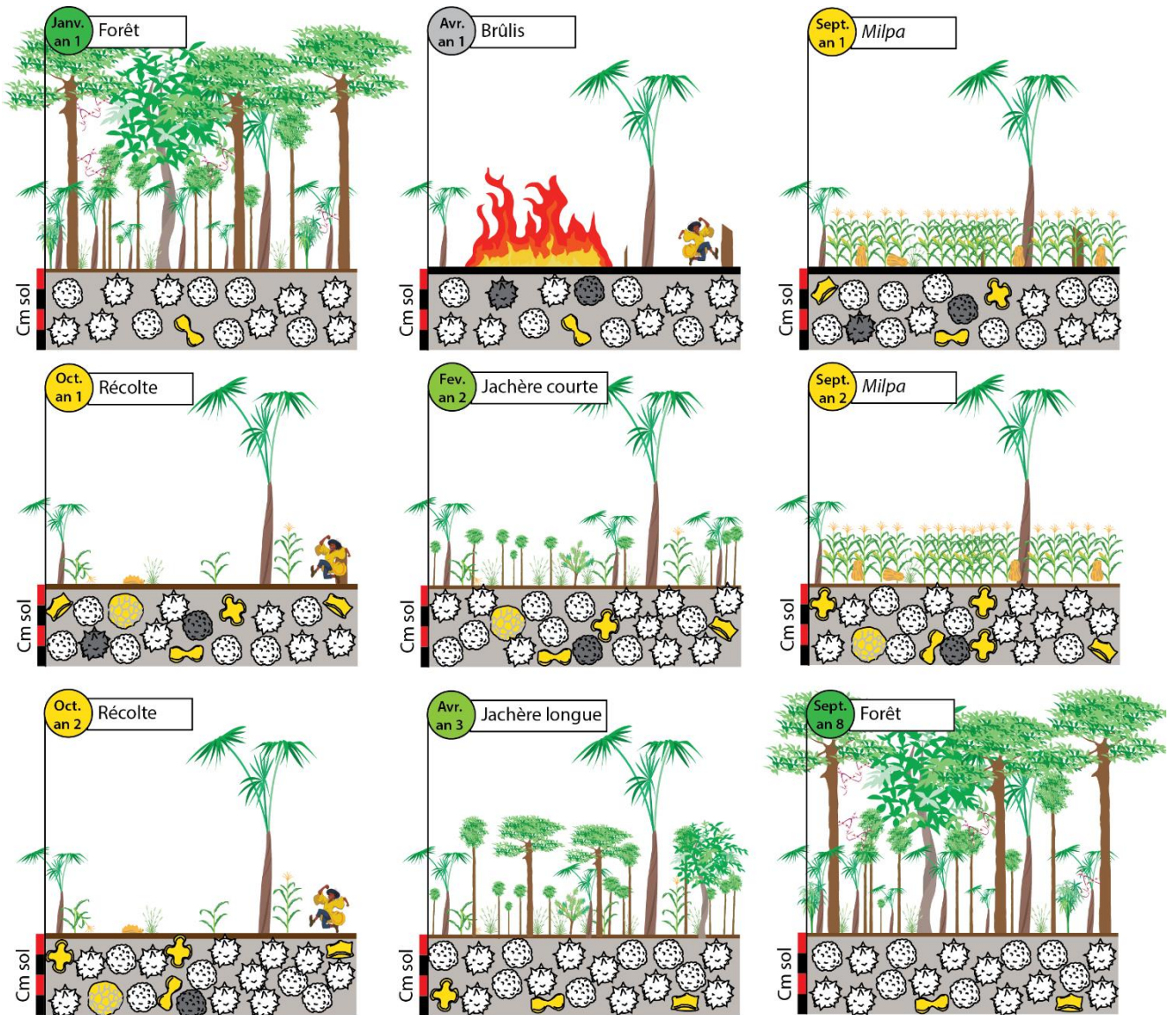


Figure 4.8 : Schéma simplifié des processus taphonomiques de conservation des phytolithes et de la surproduction de morphotypes globulaire en fonction des cycles courts et longs de la végétation dans la pratique de l'agriculture itinérante sur brûlis.

Enfin en milieu tropical, la reprise en jachère est rapide. Les travaux sur les successions végétales secondaires du Petén, réalisés par Fergusson et al. (2003), montrent qu'en moins d'une année, une végétation pionnière peut atteindre une hauteur de 2 à 3 mètres avec une densité

d'espèces végétales élevée. Le fait de laisser certains grands arbres en milieu de parcelles après le brûlis favorise la recolonisation de la forêt sur une parcelle (Fergusson et al., 2003). Ainsi, la culture de *milpa* est très rapidement remplacée par une végétation riche en petits arbres ligneux et en palmiers. Les dépôts issus de cette végétation (chute de branches, de feuilles, racines, fruits ...) vont participer à la dilution des phytolithes de Poaceae et de cultigènes dans le cortège arboricole initial, ligneux et palmiers (Fig 4.8).

Pour résumer en d'autres termes cette hypothèse, la domination des environnements végétaux par des dicotylédones ligneuses et des palmiers entraîne une saturation des assemblages de phytolithes de sols modernes par leurs morphotypes, à savoir les *Globular decorate* et les *Globular echinate*. La perturbation de ce signal phytolithique, lors de la croissance d'un nouvel environnement végétal, nécessiterait un apport important des morphotypes de cette nouvelle végétation, sur un temps assez long. Dans le cadre de nos environnements de *milpa*, il aurait fallu une occupation des céréales et cultigènes plus longue sur les parcelles afin d'alimenter les assemblages de sols modernes de morphotypes GSSCP ou *Globular facetate*. Mais la limite écologique, induite par les sols du Petén à une agriculture vivrière longue, n'a certainement pas permis d'intégrer les traces d'une ouverture du milieu dans les assemblages forestiers originels. Ce phénomène d'absence d'enregistrement de pratiques agricoles récentes (inférieures à 10 ans) associé à une domination des morphotypes de Dicotylédones et de palmiers a également été montré dans d'autres milieux tropicaux (Chabot et al., 2018).

iv). Limites à ces hypothèses

Les assemblages de phytolithes sur les parcelles avec une végétation particulière, comme la fougeraie (P16) et la savane (P19), nuancent cette hypothèse. La fougeraie concentre une grande quantité de fougères de type **Cispaz** (*Pteridium caudatum*) qui se traduit dans l'assemblage par près de 15% de *Sclereid* alors que l'ensemble des autres environnements n'en possèdent en moyenne que 1 à 2% (Fig 4.5). A l'inverse, la parcelle P19 est riche en **Zakate mosote** (*Cenchrus brownii*), une Poaceae Panicoïdeae qui constitue la population de cette savane. Toutefois, son assemblage est dépourvu de GSSCP. Selon notre hypothèse, cela indiquerait que la parcelle de fougères est en place depuis longtemps, voire, n'a jamais été cultivée. Concernant la parcelle de savane, lors des entretiens, le cultivateur nous a indiqué qu'elle avait été cultivée. Si l'on suit notre hypothèse, cela voudrait dire que la parcelle a été cultivée il y a peu de temps et que la phase de repousse de la jachère est perturbée par une population de Poaceae (Fergusson et al., 2003). Toutefois, ce mécanisme écologique évolué d'une perturbation n'est pour le moment pas enregistré dans les assemblages.

La principale limite à notre hypothèse correspond à l'incertitude de l'historique des parcelles. Les entretiens nous ont permis de nous faire une idée générale des cycles de végétation mais ne nous permettent pas de reconstruire précisément l'histoire du parcellaire. Ces données pourraient être obtenues par une étude d'images satellites des dernières années. Ces documents nous permettraient, notamment, de dater l'ouverture des parcellaires. Enfin, la réalisation de sondages

géomorphologiques sur certains parcellaires permettrait de tester les hypothèses taphonomiques de mobilité verticale de certains phytolithes, biaisant ainsi la lecture de l'assemblage.

Conclusion :

Le projet initial d'enregistrement d'un signal agricole dans les sols et de la discrimination des pratiques agraires par les assemblages de phytolithes n'a pas répondu aux attentes. En effet, malgré une activité agricole attestée sur plusieurs dizaines d'années pour la plupart des parcelles, les assemblages de phytolithes correspondent tous à des environnements végétaux fermés de types forestiers. Ni l'ouverture des parcellaires, ni la culture de plantes productrices de phytolithes spécifiques n'ont modifié le signal forestier initial des sols de surface. La pratique du brûlis, qui aurait pu marquer les phytolithes par une carbonisation, n'est également pas enregistrée dans les assemblages.

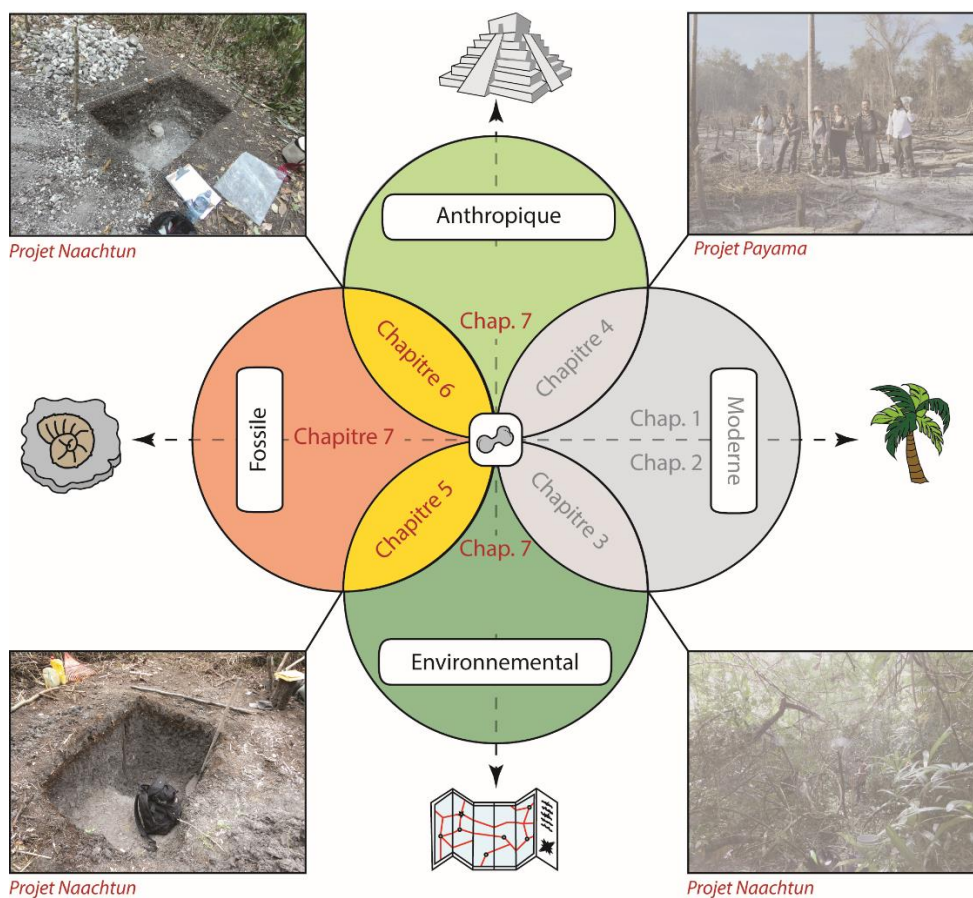
L'hypothèse retenue dans ce travail pour expliquer une telle constance dans les assemblages invoque les modes de dépôts de phytolithes en lien avec les cycles de végétations. Les cycles courts de culture de *milpa* (1 à 2 ans) avant la repousse rapide de jachères courtes (2 à 4 ans) à longues (plus de 8 ans), associés à une récolte complète des cultivars, ne vont pas permettre un enregistrement des phytolithes témoins de l'ouverture agricole des environnements. Dans le cadre des travaux paléo-environnementaux, l'information principale qui ressort de ce référentiel est que l'agriculture itinérante avec abattis-brûlis, tel qu'il est pratiqué actuellement, n'est pas enregistrée par les phytolithes. Ainsi, si un type d'agriculture de maïs est enregistré dans les sédiments fossiles de Naachtun, il faudra élargir le paradigme de l'agriculture sur brûlis comme pratique principale des basses-terres mayas, ou du moins, reconsidérer les temps de jachères. Cela implique également qu'un environnement indiqué comme fermé par les phytolithes n'implique pas forcément la présence d'une forêt.



Bill Waterson –1997

PARTIE 3

ASSEMBLAGES FOSSILES & HISTOIRE SOCIO-ENVIRONNEMENTALE



- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 5 -

Reconstitution paléoécologique d'une zone humide dans les basses-terres mayas : étude croisée de bioindicateurs du *bajo* de Naachtun (Petén, Guatemala)

Ce chapitre est constitué par un article soumis à la revue *Quaternaire* :

Testé, M., Castanet, C., Garnier, A., Limondin-Lozouet, N., Purdue, L., Lemonnier, E., Kerdreux, S., Nondédéo, P., *submitted*. Reconstitution paléoécologique d'une zone humide dans les basses-terres mayas : étude croisée de bioindicateurs du *bajo* de Naachtun (Petén, Guatemala)

Avant-propos : *Ce chapitre ayant été écrit sous le format d'un article, une partie des résultats non-publiés de ce manuscrit et du projet Naachtun n'y est pas présentée. Ces omissions volontaires seront réintégrées dans le chapitre 7 du présent document.*

La construction du référentiel phytolithique moderne de Naachtun (Chapitre 3) permet d'interpréter des assemblages de phytolithes fossiles en termes de reconstitutions paléoécologiques. Cette approche archéobotanique novatrice pour les basses-terres mayas comporte ses propres problématiques sur la capacité des phytolithes à discriminer les environnements anciens, naturels ou anthropisés. Les sédiments livrant également des fossiles de spicules d'éponges, de diatomées et des assemblages malacologiques, les analyses sur ces bioindicateurs ont été couplées à l'étude des phytolithes pour renforcer l'interprétation des écosystèmes dans leur composante hydrologique.

Pour réaliser cette étude, trois séries sédimentaires ont été sélectionnées selon la diversité de leur contexte de dépôt et leurs caractéristiques sédimentaires : M2S1 au cœur d'un *Sival* à l'ouest du *bajo*, M2S10 à mi-distance entre le versant du *bajo* et le *Sival* à l'ouest et M1S2c en pied de versant à proximité du *Sival* est. Ces séries sédimentaires sont calées dans le temps par de nombreuses dates de la période préclassique et de quelques dates de la période classique. Ainsi, une soixantaine d'échantillons de phytolithes et de bioindicateurs siliceux a été étudiée au total sur les trois séries et 40 échantillons malacologiques l'ont été sur les sondages M2S10 et M1S2c.

Les phytolithes nous indiquent l'ouverture précoce d'une zone du *bajo* au moins dès le Préclassique ancien (1600 BCE), avant la mise en place d'un lac au cours d'une période plus humide au Préclassique moyen (700-400 BCE). C'est dans ce contexte humide, au Préclassique récent, que l'on trouve les premières et seules traces d'agriculture sous la forme de phytolithes de maïs, contemporaines d'une ouverture générale du *bajo* (400-200 BCE). Le passage à la période classique (> 200 CE) marque une rupture dans la sédimentation qui se traduit par l'installation d'une mosaïque de paysages végétaux dans le *bajo*, témoignage de l'adaptation des sociétés mayas à des changements anthropiques et climatiques.

- CHAPITRE 5 -

Reconstitution paléoécologique d'une zone humide dans les basses-terres mayas : étude croisée de bioindicateurs du *bajo* de Naachtun (Petén, Guatemala)

Introduction :

L'emploi des phytolithes pour reconstituer les paléo-écosystèmes en contexte tropical a donné de bons résultats ces dernières années, notamment en Amérique latine (Piperno et al., 2007 ; Iriarte et al., 2010 ; Watling et al., 2017). Ce n'est pas, en revanche, encore le cas dans les basses-terres mayas où, malgré tous les avantages qu'elles représentent dans cette région archéologique, les reconstitutions paléoenvironnementales sont limitées à l'utilisation du pollen, pourtant rare dans ces régions karstiques tropicales (Islebe et al., 1996 ; Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2006 ; Carozza et al., 2007 ; Carrillo-Bastos et al., 2012). En effet, les études sur les phytolithes des basses-terres mayas sont peu développées et ne concernent que rarement les paléoenvironnements. Les premières études se sont surtout penchées sur la signature phytolithique des pratiques domestiques humaines par l'exploration des résidus de tartre, de vaisselles ou encore de plantes à intérêt ethnobotanique (Cumings et Magenis, 1997 ; Bozarth et Guderjan, 2004 ; Abramiuk et al., 2011). Des études plus récentes ont eu lieu sur des zones humides de sites archéologiques mayas pour reconstituer des pratiques anciennes mais ces dernières ne présentaient, en général, que des assemblages partiels (Beach et al., 2009 ; Krause et al., 2019).

L'une des difficultés à utiliser les phytolithes en paléoenvironnement est qu'ils présentent des biais taxonomiques qui empêchent de réfléchir sur la base d'espèces indicatrices (Rovner, 1971) mais qui obligent à travailler sous la forme d'assemblage de morphotypes pour discriminer un environnement (Neumann et al., 2009). Une étude paléoenvironnementale sur les phytolithes doit donc être menée en ayant un référentiel de la signature des communautés végétales de la région, de bonnes conditions de préservation et une bonne diversité de formes. A Naachtun, site archéologique à l'extrémité nord du Petén, les sédiments de la zone humide au nord du site (le *bajo*), à défaut de pollen, sont riches en phytolithes qui présentent eux-mêmes une importante diversité morphotypique. De plus, un référentiel des phytolithes des écosystèmes modernes de Naachtun a été établi récemment et a démontré le potentiel de ce bioindicateur pour ce type d'environnement (Testé et al., 2020). Enfin, les sédiments du *bajo* de Naachtun présentent de nombreux autres bioindicateurs qui peuvent être étudiés parallèlement aux phytolithes comme les spicules d'éponges, les diatomées ou encore les coquilles fossiles de gastéropodes.

Naachtun est un site qui se développe au début de la période classique (150 CE) lorsque la plupart des grandes cités voisines, comme Nakbe et El Mirador, sont abandonnées (Wahl et al., 2007, Hiquet et al., 2019). Capitale régionale durant presque un millénaire, Naachtun joue un rôle important dans l'histoire politique des basses-terres centrales par ses alliances

avec les puissances régionales Tikal et/ou Calakmul. La population de Naachtun se maintient au Classique terminal quand ces dernières et d'autres cités régionales sont abandonnées, avant d'être à son tour abandonnée vers 950 CE (Sion, 2016). Cette histoire de Naachtun, déphasée par rapport aux dynamiques régionales, en fait un site d'étude approprié pour appréhender la capacité d'adaptation des populations mayas face aux particularités de leur territoire. Cela passe, notamment, par une compréhension des pratiques agricoles et de gestion des ressources comme l'eau et les sols. Les travaux récents de télédétection par le LiDAR ont permis de mettre en avant un réseau dense de structures anthropiques (canaux, réservoirs, terrasses, etc.) aux alentours de la cité et notamment dans les zones humides et les *bajo* (Canuto et al., 2018). Ils renforcent l'intérêt à porter à ces espaces périphériques des cités mayas et à leur possible fonction agricole.

Si l'intention principale de ce travail vise à reconstituer la végétation passée dans une problématique d'étude des interactions sociétés-environnements, des questions sous-jacentes animent son développement. La première d'entre-elles concerne la capacité des phytolithes à caractériser les environnements passés et avec quel degré de précision. Si le référentiel moderne de Naachtun a permis de caractériser les milieux modernes, les incertitudes sur les communautés végétales anciennes sont encore importantes et il reste à déterminer si les assemblages fossiles permettront de retrouver ces environnements modernes mais également d'interpréter des environnements aujourd'hui non-référencés à Naachtun, notamment les environnements anthropisés. Ce questionnement concerne aussi la possibilité d'identifier les phytolithes de cultigènes dans des contextes de zones agraires éloignées du site puisque jusqu'à maintenant, ils n'ont été observés régionalement que dans des contextes archéologiques (Cummings et Magenis, 1997 ; Bozarth et Guderjan, 2004). Enfin, l'étude parallèle de plusieurs bioindicateurs a pour but de coupler les signaux écologiques pour permettre une meilleure reconstitution. Si les concentrations de diatomées et de spicules d'éponges ont été évaluées pour les écosystèmes de *bajo* – et donc de *Sival* – à Naachtun (Testé et al., 2020), la présence supposée d'anciens lacs ou de conditions eutrophiques (Castanet et al., 2017), environnements non-référencés, pourrait rendre non-interprétables les résultats sur ces bioindicateurs. Malgré une taxonomie bien établie, l'autécologie des gastéropodes dulçaquicoles du Petén est mal connue, même si l'on compte de rares référentiels écologiques présentant les valences écologiques d'espèces d'eau douce des basses-terres (Goodrich et Van der Schalie, 1937). L'utilisation des mollusques fossiles des sédiments du *bajo* a donc pour but de vérifier si un signal hydrologique ou botanique peut, toutefois, confirmer celui présenté par les phytolithes et les bioindicateurs siliceux.

Ce travail s'organise autour d'un carottage à main et de deux sondages profonds réalisés dans les sédiments argileux de la zone du *bajo* au nord du site. Chacun de ces prélèvements a été étudié par une vingtaine d'échantillons de phytolithes, au sein desquels les concentrations en spicules d'éponges et diatomées ont été évaluées. Parallèlement à l'étude des phytolithes, les assemblages malacologiques de deux sondages profonds, 40 échantillons au total, ont été étudiés et comparés aux données des bioindicateurs microsiliceux. Ce travail s'organise ici par une présentation initiale du contexte sédimentaire extrait du travail de

Castanet et al. (2017). Les résultats sur les assemblages de phytolithes et bioindicateurs siliceux sont présentés et interprétés d'après différentes approches, avant une présentation sur les mêmes modalités des assemblages malacologiques. Enfin, cette étude intégrant des données naturalistes a finalement pour but d'être comparée avec les données archéologiques du site pour mieux comprendre les interactions humains-environnements dans ces écosystèmes tropicaux particuliers.

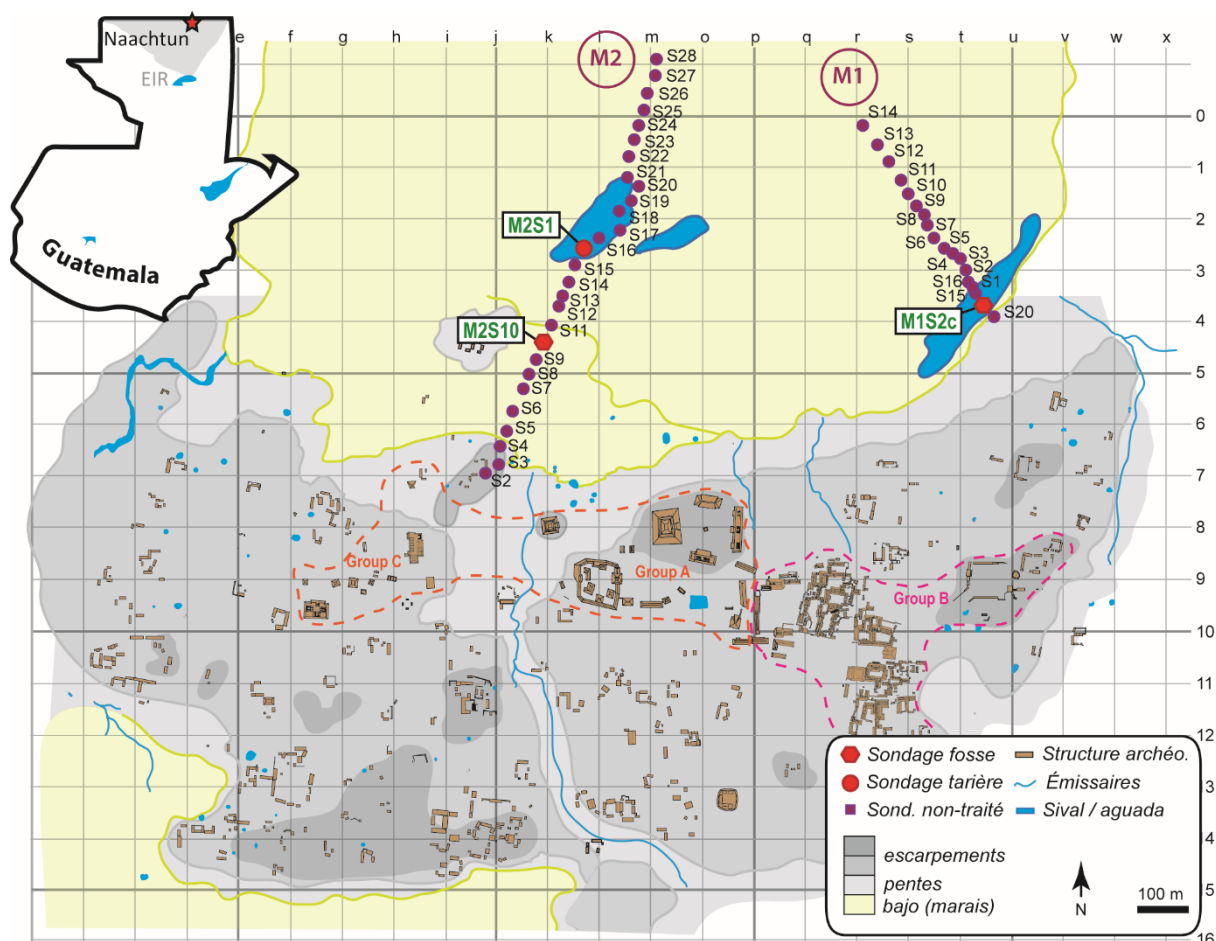


Figure 5.1 – Localisation du site de Naachtun au Guatemala (EIR = *Elevated Interior Region*) et plan simplifié du site indiquant la localisation des deux sections est et ouest de sondages sédimentaires

I. Aire d'étude

1. Le site archéologique de Naachtun

Le site de Naachtun (Fig 5.1), à l'extrême nord du Guatemala, est connu des *chicleros* (exploitants de la sève du *chicle*, *Manilkara zapota*) depuis au moins 1916 et son signalement par l'un d'eux, Alfonso Ovando (Morley, 1938). Le site a été partiellement étudié au début du 20^e siècle (Lundell, 1932 ; Morley, 1938) puis à partir des années 2000 (Reese-Taylor et al., 2005). Depuis 2010, le programme franco-guatémaltèque (CNRS/Université Paris I Panthéon Sorbonne - Université San Carlos de Guatemala) regroupe des équipes d'archéologues et de paléoenvironmentalistes et a permis d'étudier 200 Ha du site (Nondédéo et al.,

2014), soit 150 Ha supplémentaires par rapport aux projets précédents. Il a fait l'objet récemment d'une couverture LiDAR (Canuto et al., 2018).

Après une occupation du site éparse au Préclassique récent (400-200 BCE ; Hiquet et al., 2016), la cité de Naachtun est fondée autour de 150 CE, à la transition Préclassique-Classique. Au même moment, de grandes cités du nord du Petén, comme El Mirador, Nakbe, ou encore Ceibal, sont abandonnées (Wahl et al., 2007 ; Inomata et al., 2017) amenant des mouvements de populations dans la région. Située entre Tikal et Calakmul, Naachtun va jouer un rôle politique majeur au cours de la période Classique, notamment par des jeux d'alliances jusqu'au début du IX^{ème} siècle (Nondédéo et al., 2016). A partir de 830 CE, la cité se vide graduellement avant d'être abandonnée définitivement aux alentours de 950-1000 CE (Nondédéo et al., 2013 ; Dussol et al., 2019 ; Hiquet, 2019).

2. Situations géographiques de Naachtun

i). Contextes géomorphologiques et biogéographiques

Le nord du Petén correspond aux marges méridionales d'un large plateau karstique (*Elevated Interior Region* ; Fig 5.1) qui s'étend jusqu'au nord de la péninsule du Yucatán (Dunning et al., 2012). La région de Naachtun présente un paysage de collines et d'escarpements où le drainage est essentiellement souterrain causant des structures d'infiltration sous forme de grandes dépressions de type poljé, qui porte le nom de *bajo* (Dunning et al., 1998 ; Marshall et al., 2007). Ces *bajo* prennent souvent la forme de marais qui sont inondés pendant la saison des pluies de Mai à Novembre (Hastenrath, 1976 ; Hidalgo et al., 2015) et qui peuvent conserver en saison sèche des plans d'eau résiduels (*Sival*) et plus rarement de larges étendues d'eau (*laguna*). Contrairement aux zones escarpées qui possèdent des rendosols peu épais (< 50 cm), les vertisols très argileux des *bajo* atteignent de plus grandes profondeurs (1 à 2m). Ces zones étaient certainement utilisées par les Mayas à des fins hydrauliques mais également agraires (Dunning et al., 1998).

Les communautés végétales de Naachtun ont été décrites pour la première fois dans les années 1930 par Lundell (1937) et réétudiées récemment (Testé et al., 2020). Les zones de collines du site sont couvertes de hautes forêts semi-persistantes (30-40 m) nommées *Ramonal/Zapotal*, riches en arbres comme les Burseraceae (*Bursera simaruba*, *Protium copal*, ...), Fabaceae (*Lonchocarpus guatemalensis*, ...) Meliaceae (*Swietenia macrophylla*, ...), Moraceae (*Brosimum alicastrum*, ...) ou encore Sapotaceae (*Manilkara zapota*, *Pouteria* sp., ...). Les sous-bois du *Ramonal* sont relativement épars et caractérisés par la présence de palmiers *xate* (*Chamaedorea elegans*) et d'arbustes *cordoncillo* (*Piper* sp.) tandis que ces espèces sont moins dominantes dans les sous-bois de *Zapotal*, parfois remplacées par des palmiers du genre *Sabal* sp. Les sous-bois des forêts-hautes recouverts par de denses fourrés de bambous *carrizo* (*Rhipidocladum bartlettii*) caractérisent les zones de *Carrizal*.

Les zones du *bajo* sont couvertes par une forêt basse (5-8 m) où les communautés végétales sont adaptées aux sols argileux, aux submersions saisonnières et aux périodes de dessiccation (Lundell, 1937). Celles-ci sont principalement composées de petits arbres appartenant aux familles des Anacardiaceae (*Metopium brownei*, ...), Euphorbiaceae (*Croton guatemalensis*, ...), Fabaceae (*Acacia* sp., *Mimosa* sp.) et Myrtaceae (*Eugenia* sp.). La structure des forêts de *bajo* varie en fonction des zones de la dépression. A proximité des versants et dans des zones non-inondées, le sous-bois dominé par des palmiers (*Cryosophila stauracantha*, *Sabal* sp.) caractérise les zones d'*Escobal*. A mesure qu'on s'éloigne du versant, les palmiers deviennent rares et laissent place à une forêt dense de petits arbres hétérogènes et diversifiés, nommée dans nos travaux sous le nom de *Chechemal* (Testé et al., 2020). A proximité de zones de *Sival*, les communautés végétales prennent la forme d'une forêt basse monospécifique de *tinto* (*Haematoxylum campeche*) qui désigne les écosystèmes éponymes de *Tintal*. La zone d'eau résiduelle, le *Sival*, est entourée d'une auréole végétale herbacée composée d'Araceae (*Pistia stratiotes*), de Cyperaceae (*Cyperus articulatus*), de Poaceae (*Phragmites australis*) et de rares arbustes *zarza* (*Mimosa pigra*) (Lundell, 1937 ; Testé et al., 2020).

ii). Géographie de Naachtun

Le site archéologique de Naachtun se compose d'un épicerne politique de 33Ha, constitué de trois groupes monumentaux A, B, C, eux-mêmes distribués d'ouest en est, le long de deux collines séparées par un talweg (Fig 5.1). Une vaste zone résidentielle de 150 Ha recouvre les collines autour du centre cérémoniel avec pas moins de 600 structures archéologiques (Nondédéo et al., 2014). La couverture LiDAR a permis de mettre en avant que toutes les zones du territoire de Naachtun, en dehors des *bajo*, avaient une densité comparable à cette zone résidentielle (Canuto et al., 2018).

Naachtun est bordée au nord et au sud par deux zones dépressionnaires, de type polje karstique, qui sont nommées *bajo* (Beach et al., 2003 ; Castanet et al., 2016). Le *bajo* nord, plus profond, est alimenté par plusieurs émissaires, actifs en période de pluie, dont 2 délimitent la zone résidentielle du site à l'ouest et à l'est. Ce *bajo* est donc en eau saisonnièrement et présente au moins deux zones humides pérennes durant la saison sèche, nommées *Sival*, au centre et à l'est de celui-ci (Fig 5.1). Ce type d'environnement palustre et saisonnier implique des dynamiques sédimentaires, alluviales et colluviales, propices à l'enregistrement de bioindicateurs environnementaux fossiles.

II. Cadres géomorphologique et chrono-stratigraphique des archives sédimentaires

L'étude du remblaiement sédimentaire du *bajo* (poljé karstique) repose sur la réalisation et l'étude de 44 sondages sédimentaires implantés selon deux sections principales ouest et est (Fig 5.1 ; Fig 5.2).

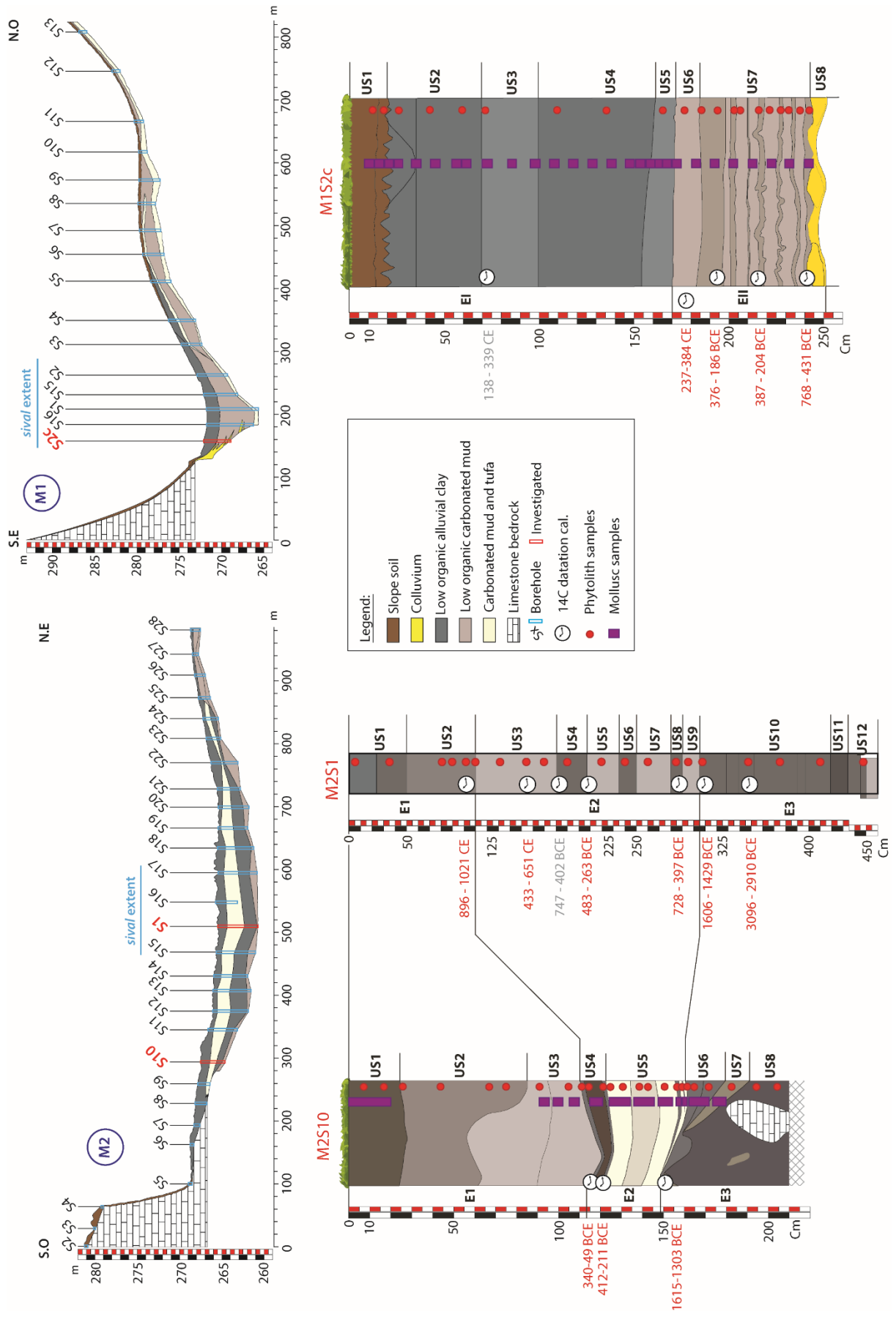


Figure 5.2 – Étude du remblaiement sédimentaire du bajo et position des 44 sondages sédimentaires. Description de la lithologie des 3 sondages sédimentaires retenus et position des échantillonnages et des datations radiocarbones.

Le cadre chronologique établi s'appuie sur 15 datations par le radiocarbone (Fig 5.2 ; Tab 5.1). La morpho-stratigraphie et le cadre chrono-stratigraphique des dépôts sédimentaires du *bajo El Infierno* ont ainsi été établis (Castanet et al. 2017).

1. Section ouest (M2)

La section M2, située à l'ouest du *bajo*, révèle un remplissage sédimentaire alluvial et colluvio-alluvial fin. 4 principaux ensembles sédimentaires sont identifiés (M2-E4 à M2-E1). Ils présentent une géométrie tabulaire de comblement de bassin sédimentaire (Fig 5.2). Des dépôts sédimentaires détritiques argileux, pauvres en matière organique, y alternent avec des dépôts argileux plus fortement carbonatés et également peu organiques.

i). Sondage M2S1

Le sondage carotté M2S1 est implanté dans le *Sival* actuel qui se trouve au centre de ce petit bassin. La puissance des dépôts y dépasse les 4,5m (Fig.2). Il est composé de 12 unités stratigraphiques (US1 à US12) regroupées en trois ensembles principaux (E1 à E3). Les 7 datations radiocarbone réalisées révèlent un âge des dépôts compris dans les derniers 5000 ans (Fig 5.2 ; Tab 5.1).

L'ensemble basal étudié ici, M2-E3, a une puissance de 1,50 mètre (M2S1-US12 à M2S1-US10). Il est composé de dépôts argileux peu carbonatés. L'âge du toit de cet ensemble avoisine 1606-1429 BCE (Fig 5.2). L'ensemble médian M2-E2 (M2S1-US9 à M2S1-US3) correspond à des dépôts argileux plus carbonatés. Ces dépôts se sont mis en place entre 397 BCE et 433 CE selon une période de durée minimale ou plus largement entre 1606 BCE et 1021 CE selon une période de durée maximale. Une inversion stratigraphique des dates qui encadrent M2S1-US4 est observée. À la vue de la logique stratigraphique et pour une hypothèse parcimonieuse, la date ^{14}C 747-402 BCE a été rejetée. Enfin, l'ensemble supérieur M2-E1 (M2S1-US2 et M2S1-US1) constitue la partie supérieure de cette série sédimentaire (Fig 5.2). Il est constitué de dépôts argileux plus faiblement carbonatés. Sa base est datée à 896-1021 CE.

ii). Sondage M2S10

Le sondage (fosse pédologique profonde) M2-S10 a été réalisé à mi-distance entre le *Sival* actuel et le pied du versant du *bajo*. Il se situe dans une zone exondée actuellement durant une majeure partie de l'année. La puissance des dépôts dépasse 2 m. La série comprend huit US (M2S10-US8 à M2S10-US1) également réparties en trois principaux ensembles sédimen-

taires M2-E3 à M2-E1. Les 3 ensembles sédimentaires de M2S1 et de M2S10 sont corrélés dans le modèle de coupe stratigraphique reconstituée (Fig 5.2).

Core	Depth (cm) or SU(stratigraphic unit)	Laboratory reference	Radiocarbon date (BP)	Material	Calibrated age (2 σ) (cal. BC/AD) *
NA13-M1S2C	71-73	Poz-68786	1775 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal CE 138: cal CE 200] 0,137308 [cal CE 206: cal CE 339] 0,862692
	SU-6	Poz-90901	1740 \pm 30 BP	Charcoal	[cal CE 237: cal CE 384] 1
	185-186,5	Poz-70741	2205 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 376: cal BCE 191] 0,994887 [cal BCE 189: cal BCE 186] 0,005113
	227-229	Poz-68451	2235 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 387: cal BCE 342] 0,23907 [cal BCE 326: cal BCE 204] 0,76093
	245-246	Poz-68727	2470 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 768: cal BCE 476] 0,968126 [cal BCE 464: cal BCE 453] 0,012747 [cal BCE 445: cal BCE 431] 0,019127
NA13-M2S1	101-101,5	Poz-68787	1070 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal CE 896: cal CE 927] 0,215267 [cal CE 941: cal CE 1021] 0,784733
	154-157	Poz-68448	1480 \pm 40 BP	Organic clayey alluviums	[cal CE 433: cal CE 458] 0,036697 [cal CE 467: cal CE 488] 0,036062 [cal CE 533: cal CE 651] 0,927241
	182-183	Beta-474443	2420 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 747: cal BCE 685] 0,161163 [cal BCE 666: cal BCE 642] 0,047525 [cal BCE 586: cal BCE 581] 0,004478 [cal BCE 556: cal BCE 402] 0,7868334
	204-205	Beta-474444	2330 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 483: cal BCE 437] 0,055867 [cal BCE 435: cal BCE 360] 0,936677 [cal BCE 270: cal BCE 263] 0,007456
	280-281	Beta-474445	2390 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 728: cal BCE 713] 0,021623 [cal BCE 710: cal BCE 694] 0,024424 [cal BCE 656: cal BCE 655] 0,001145 [cal BCE 542: cal BCE 397] 0,952807
	307-309	Poz-68450	3225 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 1606: cal BCE 1583] 0,061062 [cal BCE 1559: cal BCE 1553] 0,011009 [cal BCE 1546: cal BCE 1429] 0,927929
	348-349	Poz-68728	4385 \pm 35 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 3095: cal BCE 2910] 1
NA13-M2S10	110-111	Poz-75416	2115 \pm 30 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 340: cal BCE 328] 0,017132 [cal BCE 204: cal BCE 49] 0,982868
	121-122	Poz-75251	2305 \pm 35 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 412: cal BCE 352] 0,783725 [cal BCE 296: cal BCE 228] 0,207177 [cal BCE 221: cal BCE 211] 0,009097
	160-161	Poz-75252	3190 \pm 60 BP	Organic clayey alluviums	[cal BCE 1615: cal BCE 1374] 0,927847 [cal BCE 1351: cal BCE 1303] 0,072153

Tableau 5.1 – Tableau de description des dates radiocarbones *CALIB 7.0 uses the 2013 international calibration datasets. Stuiver, M., Reimer, P.J., and Reimer, R.W., 2019, CALIB 7.1 [WWW program] at <http://calib.org>

L'ensemble basal M2-E3 (M2S10-US8 à M2S10-US6) est composé de 50 cm de dépôts alluviaux argileux faiblement organiques. L'ensemble médian M2-E2 (M2S10-US5), d'une épaisseur de 50cm, correspond à un dépôt très carbonaté, tufacé, riche en coquilles de gastéro-

podés. Ce niveau est entrecoupé de rares passées argileuses millimétriques d'origine détritique. Il est sellé par les dépôts alluviaux pédogénésés correspondant à M2S10-US4 (10 cm d'épaisseur), interprétés comme étant un paléosol. La base de M2S10-US5 est postérieure à 1615-1303 BCE tandis que M2S10-US4 est scellée à sa base et à son toit par deux dates qui présentent les fourchettes respectives suivantes, 412-211 BCE et 340-49 BCE (Fig 5.2). La partie supérieure de la série, M2-E1 (S10-US3 à S10-US1), est constituée par un mètre d'argiles.

La géométrie des US observées en stratigraphie révèle d'importantes déformations post-dépositionnelles des structures sédimentaires originelles (présence de nombreuses involutions). Les US des ensembles supérieurs semblent être les plus impactées. Les processus qui sont à l'origine de ces déformations pourraient être ceux qui sont à l'origine de l'argiloturbation, tels qu'ils ont été décrits par Beach et al. (2009).

2. Section est (M1) : le sondage M1S2c

Le remblaiement sédimentaire de cette partie est du *bajo El Infierno* est relativement similaire à celui de la section ouest (Fig 5.2). Les principales différences sont la localisation du *Sival* actuel immédiatement au pied du versant du *bajo*, la présence de colluvions plus grossières intercalées dans les alluvions et la puissance accrue du remblaiement (supérieure à 6m).

Le sondage (fosse pédologique profonde) M1-S2c a été réalisé au pied du versant du *bajo*, dans le *Sival*. La série sédimentaire présente deux grands ensembles sédimentaires M1-E2 et M1-E1 et 8 US (M1S2-US8 à M1S2-US1) (Fig 5.2). Quatre datations par le radiocarbone ont été réalisées (Fig 5.2 ; Tab 5.1).

L'ensemble basal M1-E2 (S2-US8 à S2-US6) présente à sa base des colluvions grossières (M1S2-US8). Il comprend ensuite un dépôt limono-argileux carbonaté, faiblement organique et lité (M1S2-US7, puissance : 60cm). La datation obtenue à la base des alluvions de cette unité indique un âge de 768-431 BCE tandis que la datation des dépôts situés à 228 cm de profondeur indique un âge de 387-204 BCE et la datation de dépôts situés au sommet donne un âge de 376-186 BCE. Enfin, l'US M1S2-US6 est constituée de dépôts argileux carbonatés et est datée latéralement dans la coupe stratigraphique à 237-384 CE (datation faite sur lit de charbons).

L'ensemble sédimentaire supérieur, ensemble M1-E1 (S2-US5 à S2-US1), est composé d'1,70m d'argile homogène peu carbonatée. A une profondeur de 75 cm, une datation par le radiocarbone indique un âge de 138-339 CE. Une inversion stratigraphique des âges obtenus est ainsi observée entre le sommet de M1-E2 et M1-E1.

La géométrie des US de l'ensemble M1-E1 révèle également d'importantes déformations post-dépositionnelles des structures sédimentaires originelles (argiloturbation). La déformation des US de M1-E1, l'éventualité d'avoir daté des matériaux organiques déstockés et la fiabilité des datations effectuées sur lit de charbons nous conduisent à conserver les âges obtenus pour l'ensemble inférieur et rejeter la datation obtenue dans l'ensemble supérieur (M1-E1, âge 138-339 CE).

III. Étudier les paléoenvironnements à l'aide de bioindicateurs

1. Échantillonnage de l'étude

Pour les trois sondages de l'étude paléoenvironnementale (M2S1, M2S10, M1S2c), la sélection des échantillons a été réalisée en fonction des US et des datations radiocarbone. Pour l'étude des phytolithes, au moins un échantillon d'1cm d'épaisseur a été prélevé pour chaque US. Pour les US épaisses (supérieures à 50cm) ou présentant un intérêt sédimentaire et/ou pédologique, plusieurs échantillons ont été prélevés. Au total, 63 échantillons de 1 cm d'épaisseur ont été prélevés sur les trois profils pour l'étude des phytolithes (Fig 5.2).

Les mollusques ont été étudiés sur les séries sédimentaires M2S10 et M1S2c. Le prélèvement par sondage carotté de M2S1 n'a pas permis d'obtenir un volume sédimentaire suffisant pour ce type d'étude (Fig 5.2). Dans le sondage M2S10, l'échantillonnage s'est concentré sur l'ensemble carbonaté M2-E2 en raison de sa richesse en coquilles de gastéropodes mais également sur les zones de transition avec les ensembles inférieurs et supérieurs. 11 échantillons sédimentaires de 0,5 à 4,5 litres ont été prélevés sur des épaisseurs de 4 à 12cm, US par US ou sous-US par sous-US. Dans le sondage M1S2c, 36 échantillons malacologiques de 5 à 10 litres ont été prélevés en colonne stratigraphique pour l'ensemble M1-E1. L'ensemble M1-E2 a été prélevé sous la forme de six carottages contigus dans les ensembles stratigraphiques, pour un total de 15 échantillons de 0,6 litres.

2. Application des phytolithes

i). Classification morpho-écologique

Les biais taxonomiques dus à la production de nombreux phytolithes communs entre les plantes entraînent généralement l'impossibilité de lier un morphotype à un taxon plus inclusif que la famille (Rovner, 1971). Cela implique, pour nommer les morphotypes, de ne plus les associer à un taxon mais à une nomenclature parallèle qui aujourd'hui repose sur leur morphologie (Madella et al., 2005 ; Neumann et al., 2019). Les grandes classes de phytolithes sont résumées dans les paragraphes ci-après et dans le tableau 5.2.

Les grands morphotypes irréguliers, ornementés (faceted, pitted) ou lisses (psilate) sont classés comme Sclereid (Tab 5.2) et indiquent la présence d'angiospermes arborées et ligneuses (Dicotylédones, Magnoliideae – Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Strömberg, 2004).

Morphotype	Taille	Plante productrice	Organe product.	Traitement dans assemblage	Références
TSP	Irregular psilate	Dicots L / Magno.	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Stromberg, 2004 ; Collura & Neumann, 2016
	Irregular faceted	Dicots L / Magno. / Pteri.	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Neumann et al., 2009 ; Collura & Neumann, 2016
	Irregular pitted	Dicots L / Magno	Bo / Ec / Fe	Arbres	Postek, 1981 ; Runge, 1999 ; Dickau et al., 2013 ; Collura & Neumann, 2016
	Mixed	Dicots L / Monocots	Bo / Ec / Fe / Fr	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; 2006 ; Stromberg, 2004 ; Collura & Neumann, 2016
Globular	psilate	Dicots L / Monocots H	Bo / Ec / Fe / Fr	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; Alexandre et al., 1997 ; Collura & Neumann, 2016
	ornate	Dicots L / Monocots H	Bo / Ec / Fe / Fr	Arbres ligneux dicots	Piperno, 1988 ; Runge, 1999 ; Garnier, 2012 ; Collura & Neumann, 2016
	nodular	Dicots L	Bo / Ec / Fe	Arbres ligneux dicots	Garnier et al., 2013 ; Collura & Neumann 2016
	compound	Dicots L	Bo / Ec	Arbres ligneux dicots	Runge, 1999 ; Piperno et al. 2000 ; Piperno 2006 ; Novello et al. 2018
	Facetate	Cucur. / Annon. / Malva.	Fr / Fe	Courges / Cucur. rampantes	Piperno, 2006 ; Fenwick et al., 2011 ; Thomas, 2011 ; Benevenuto et al., 2015
	Echinate	Areaceae / Bromeliaceae	All	Palmiers	Piperno 1988 ; Kealhofer & Piperno, 1998 ; Thomas, 2011 ; Benvenuto et al., 2015
	Hat Shape	Areca. / Maran. / Orchi.	All	Palmiers	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017
	Bilobate	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Lu & Liu, 2003 ; Piperno, 2006 ; Neumann et al., 2017
	Cross	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017
	Triangle cross	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017
GSSCP	Polylobate	Poaceae	Fe / Fl	Panicoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Piperno & Pearsall, 1998 ; Rudall et al., 2014 ; Neumann et al., 2017
	Saddle	Poaceae	Fe / Fl	Chloridoïdes / graminées	Twiss et al., 1969 ; Fredlund & Tieszen, 1994 ; Garnier et al. 2013 ; Neumann et al., 2017
	Rondel	Poaceae	Fe / Fl	Graminées	Fredlund & Tieszen, 1994 ; Barboni & Bremond, 2009 ; Neumann et al., 2017
	three - pikes	Bambusoideae	Fe / Fl	Bambous	Piperno & Pearsall, 1998 ; Pearsall et al., 2003 ; Gu et al., 2013
	Top decorate	Zea sp.	Fe / Fl	Téosinte / Maïs	Bozarth, 1998 ; Pearsall et al., 2003
	Papillae	Cyperaceae	Fe / Gr	Herbes hygrophiles / cypéracées	Psilate
	Bulliform flabellate	Cyperaceae / Poaceae	Fe	Herbes monocots	Pearsall & Dinan, 2002 ; Bremond et al., 2005a ; Madella et al., 2005 ; Piperno et al., 2006
	Psilate	Gymnospermes / Angiosp.	All	Tous types de plantes	Piperno, 1988 ; Bozarth, 1992 ; Mulholland & Rapp, 1992 ; Collura & Neumann, 2016
	Decorate	Gymnospermes / Angiosp.	All	Tous types de plantes	Piperno, 1988 ; Mulholland & Rapp, 1992 ; Stromberg, 2004 ; Blinnikov, 2005 ;
	Psilate	Dicots / Monocots / Pinoph.	Bo / Ec / Fe / Ti	Tous types de plantes	Twiss et al., 1969 ; Runge, 1999 ; Stromberg, 2004
Decorate	Angiosp. / Pinoph. / Pteri.	Bo / Ec / Fe	Tous types de plantes	Twiss et al., 1969 ; Stromberg, 2004 ; Honaine et al., 2009 ; Galego & Distel, 2014	
Bloc. = Blocky	Taxon abrégé = Angiospermes, Annonaceae, Arecaceae, Cucurbitaceae, Malvaceae, Marantaceae, Orchidaceae, Pteridophyte, Pinophyte				
Elg. = Elongate	L = Ligneux H = Herbes				
	Bo = Bois Fe = Feuille Fr = Fruit Rz = Racine / Rhizome All = Toute la plante Ec = Écorce Fl = Inflorescence Gr = Graine Ti = Tige				

Tableau 5.2 – Classification des morphotypes de phytolithes en lien avec leur producteur botanique et indication du traitement dans les assemblages. Le tableau intègre uniquement les morphotypes croisés dans les assemblages.

Les formes sphéroïdes sont classées comme Globular (Tab 5.2). L'ornementation des morphotypes a été considérée comme caractère distinctif de type écologique de plantes. Les formes lisses et granuleuses, Globular psilate et Globular decorate, sont interprétées comme phytolithes de Dicotylédones ligneuses (Alexandre et al., 1997 ; Collura et Neumann, 2017). Les formes facettées, les Globular facetate, sont plutôt associées aux courges et aux Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000). Enfin, les morphotypes épineux, sphériques, les Globular

echinate, ou hémisphériques, les Hat shape, sont associés aux Arecaceae qui les produisent en grande quantité (Fenwick et al., 2011 ; Benvenuto et al., 2015).

Les formes de petite taille (< 25µm) à faces opposées sont nommées GSSCP pour Gras Sicilica Short Cell Phytolith et sont produites dans la majorité des sous-familles de Poaceae (Tab 5.2 ; Twiss et al., 1969 ; Neumann et al., 2017). On retrouve des formes Lobate, aux faces lobées donc, de 2 à 5 ou 6 lobes, organisés ou non le long d'une tige. La plupart des formes Lobate sont produites chez les Panicoïdeae. Les Saddle sont des formes où les faces ont des côtés opposés convexes aux extrémités et concaves sur les bords, donnant un aspect de selle aux morphotypes. Ils sont majoritairement formés dans la sous-famille des Chloridoïdeae. Enfin, les Rondel possèdent une forme générale en cylindre où la face supérieure peut être ornementée de manière diagnostique comme chez le maïs qui présente une forme de vague (Pearsall et al., 2003) ou les bambous avec une tête épineuse (Tab 5.2 ; Piperno et Pearsall, 1998 ; Pearsall et al., 2003).

Les nombreuses formes coniques avec des bords tabulaires sont regroupées sous le morphotype Papillae. La morphologie du cône, le nombre de cônes, l'ornementation et la forme de la table possèdent de nombreux états de caractères et ne peuvent aujourd'hui être sanctionnés d'une classification fine. Toutes ces formes sont considérées comme produites par les Cyperaceae (Ollendorf et al., 1992 ; Honaine et al., 2009). Toutefois à Naachtun, on différencie une forme particulière avec une table polygonale et ornementée et un cône angulaire, caractéristiques des zones humines (Tab 5.2 ; Testé et al., 2020) des autres morphologies.

Les morphologies en éventail donnent leur nom au morphotype Bulliform flabulate (Tab 5.2). Bien marqué par un corps plutôt courbé qui se termine en une tige étranglée, ces phytolithes sont majoritairement formés dans les feuilles d'herbes monocotylédones (Piperno, 2006 ; Gu et al., 2013).

Enfin, les morphologies polygonales, rectangulaire à allongée, sont nommées respectivement Blocky et Elongate (Tab 5.2). Ces formes peuvent avoir une ornementation ou des processus assez diversifiés. Toutefois, ces phytolithes sont présents dans la plupart des plantes terrestres et apportent peu d'information taxonomique. Ils sont cependant inclus dans les comptages dans le cadre d'une approche de modélisation écologique par des indices (comprendre ici des rapports de morphotypes).

ii). Assemblages, indices et statistiques

a). L'approche générale

Les productions différentielles de phytolithes par les plantes et la faible résolution taxonomique poussent à privilégier une approche par assemblage, dite générale (Neumann et al., 2009). Cette approche consiste à compter l'ensemble des morphotypes observés dans une lame jusqu'à ce que le seuil statistique de 200 morphotypes diagnostiques soit atteint (Strömberg, 2009 ; Zurro, 2018). Ce comptage général a pour but d'être interprété comme un signal écologique car hérité de la production et de la décomposition de toute la végétation locale. Les résultats obtenus sont représentés sous la forme de diagramme de concentrations relatives des morphotypes diagnostiques (TSLP, Globular, GSSCP et Papillae, Tab 5.2), calculées sur la somme des morphotypes diagnostiques et de morphotypes non-diagnostiques (Bulliform, blocky, Elongate ; Tab 5.2), calculées sur la base de la totalité des particules et morphotypes comptés.

Au sein de la méthode générale, il est possible également de regarder la présence de rares morphotypes caractéristiques d'une espèce ou d'un genre. Dans notre cas, les phytolithes diagnostiques de courges et de maïs peuvent être identifiés (Tab 5.2 ; Piperno, 2006 ; Ball et al., 2009). Cela est relativement important puisque ces cultigènes font partie des principales ressources chez les Mayas.

b). Approche morphométrique sur les morphotypes Cross

En l'absence de phytolithes diagnostiques de maïs (Tab 5.2 ; Pearsall et al., 2003), un traitement morphométrique peut être mis en place sur les formes de *Cross*, qui sont produits en grande quantité par la plante du maïs, afin d'attester de leur présence. Pearsall et Piperno (1990) ont proposé une méthode d'identification de phytolithes du maïs à partir de la taille du phytolithe *Cross*. Elle repose sur l'identification de 4 classes de tailles : SL < 11µm, ML 11 < x < 16 µm, L 16 < x < 20 µm et XL > 21 µm. Elle a mis en avant que le maïs produisait de plus fortes proportions de *Cross* de catégorie L que la plupart des autres plantes herbacées mais également, qu'il était l'unique producteur de *Cross* XL. Iriarte (2003), qui a utilisé cette méthode, a montré qu'aucune plante des savanes uruguayennes ne produisait un ratio aussi important de morphes L ou simplement de morphes XL.

Nous avons donc choisi de tester cette méthode pour les échantillons riches en GSSCP et notamment en morphotypes *Cross* (>10%).

c). Approche numérique : Indice et statistique

Les comptages obtenus par la méthode générale permettent de développer des approches numériques : des indices pour modéliser des états écologiques et des traitements statis-

tiques pour valider les observations des diagrammes. Un indice consiste à créer des rapports numériques de morphotypes depuis les comptages dont les gammes de valeurs pourraient refléter un signal écologique. En zone forestière, l'indice D/P permet d'estimer la couverture végétale à partir du rapport entre les phytolithes produits par les dicotylédones ligneuses et ceux produits par les Poaceae (Alexandre et al., 1997). Les valeurs inférieures à 1 indiquent des zones où la végétation est plutôt ouverte tandis que les valeurs supérieures à 1 indiquent plutôt des zones boisées. Depuis sa description, la formule a été adaptée aux différents écosystèmes (Bremond et al., 2005 ; Bremond et al., 2008 ; Garnier et al., 2013). Dans cette étude, nous utilisons la formule calibrée sur les environnements forestiers du Petén (Testé et al., 2020) dont la formule est :

Sclereid + Globular mixed / GSCP + Papillae

L'indice LU, développé à partir des assemblages modernes de phytolithes de Naachtun, cherche à identifier les environnements mixtes de zones forestières et herbacées (Testé et al., 2020). Cet indice calculé selon la formule

$$\frac{\text{(Sclereid + Globular mixed + GSCP + Papillae)}}{\text{((Sclereid + Globular mixed) * (GSCP + Papillae))}}$$

suggère la présence d'une zone mixte ou de transition entre les formations arborées et herbacées si sa valeur est inférieure à 0,25. Son application dans cette étude permet de tester cet indice aux assemblages fossiles et de voir s'il peut identifier des phases de transition dans les écosystèmes passés.

Le grand nombre d'échantillons (63) ainsi que le seuil statistique (200 morphotypes comptés) nous permettent de faire un traitement statistique des assemblages fossiles. Ce dernier lie un cluster de similarité à une analyse factorielle des correspondances. Le cluster de similarité permet de vérifier si les regroupements faits à l'aide de l'approche générale ont une réalité statistique. Les groupes trouvés par ce cluster seront ensuite étudiés au sein de l'AFC.

L'AFC a été menée en deux phases : la première correspond à l'analyse des données fossiles tandis que la seconde phase intègre des assemblages modernes d'environnements clairement identifiés (Testé et al., 2020). Cette méthodologie nous permet de vérifier si les regroupements obtenus par la CAH peuvent être interprétés écologiquement et s'ils sont similaires aux environnements modernes de Naachtun.

iii). Référentiel moderne et actualisme à Naachtun

Le travail de caractérisation des écosystèmes de Naachtun par les phytolithes repose sur la construction d'un référentiel actuel des assemblages en lien avec les communautés végétales (Testé et al., 2020). Cette étude repose sur des relevés de végétation et des prélève-

ments de phytolithes des sols de surfaces sur 43 quadrats écologiques. Elle a permis de montrer que les assemblages de phytolithes pouvaient discriminer les différents écosystèmes de Naachtun entre eux.

Les zones de forêts de collines (*ramonal/zapotal*) qui correspondent au site archéologique présentent des assemblages de phytolithes dominés en moyenne par 65% de morphotypes *Globular mixed* (*smooth, decorate, nodular, compound*) et 18% de *Hat shape*, respectivement produits par les Dicotylédones ligneuses et certaines familles d'Arecaceae. Les zones de fourrés de bambous (*carrizal*) distribuées dans les forêts de collines sont quant à elles dominées à 60% par les *Globular mixed* mais également à 20% par le morphotype *Rondel crested* identifié chez de nombreuses espèces de bambous.

Les environnements de versants et de pieds de versants sont recouverts par des forêts riches en palmiers (*escobal*). Les assemblages de phytolithes de ces milieux sont en moyenne dominés à 50% par les *Globular mixed* mais également à 40% par les *Globular echinate*, produits par certaines familles d'Arecaceae.

Les communautés végétales des *bajo* évoluent sur les marges des forêts basses mixtes (*Chechemal*) vers des forêts basses monospécifiques (*Tintal*) autour des zones d'eau pérennes qui sont des environnements palustres dominés par les herbes et les carex (*Sival*). Les assemblages des communautés de *Chechemal* sont dominés en moyenne à 80% par les *Globular mixed* et vont présenter des taux résiduels de spicules d'éponges autour de 10%. Les zones de *Tintal* ont des assemblages plus diversifiés avec en moyenne 40% de *Globular echinate*, 20% de *GSCP* (*Grass Short Cell Phytolith*) produits par les Poaceae et 20% de *Papillae* produits par les Cyperaceae. Les zones de *Tintal* forment une zone de transition avec les zones de *Sival* dont les assemblages sont en moyenne formés de 15% de *Globular mixed*, de 40% de *GSCP* et de 40% de *Papillae*. Les assemblages des zones de *Tintal* et de *Sival* sont composés en moyenne de 30% de spicules d'éponges et de 5 à 10% de diatomées.

C'est sur la base de ces assemblages modernes, calibrés sur les écosystèmes actuels de Naachtun, que sont interprétés les assemblages fossiles étudiés dans le *bajo* de Naachtun. Mais cette base interprétative ne permet pas, toutefois, d'étudier les environnements anthropiques ou actuellement étrangers à Naachtun. Ces résultats montrent également la nécessité de croiser les données phytolithiques à des bioindicateurs complémentaires.

3. Étude multiproxy : croisement des bioindicateurs

i). Spicules et Frustules

Cette étude actualiste a aussi démontré l'intérêt de prendre en compte les autres microfossiles siliceux conservés dans ces dépôts comme les spicules d'éponges et les diatomées. Ils complètent l'information paléoécologique notamment sur l'état hydrologique des écosystèmes. Ces microfossiles siliceux sont observés depuis les lames de phytolithes et sont donc

inclus dans les comptages de particules. Toutefois, leur traitement n'est pas taxonomique, du fait de l'absence de classification, mais numérique. Seules les concentrations de ces deux types de bioindicateurs sont calculées sur la base du nombre observé sur le nombre total de particules comptées. C'est cette approche comptable qui a permis d'identifier la disponibilité en eau des quadrats sur référentiel (Testé et al., 2020).

ii). Mollusques modernes et fossiles

a). Préparation et étude des échantillons malacologiques

Après séchage, l'ensemble des échantillons a été tamisé à l'Hexaméthaphosphate de sodium à 40g/L sur une maille de 500 µm. Le refus de tamis est ensuite trié en deux fractions : une fraction détritique comprenant les minéraux, des restes organiques et inorganiques dont des portions de coquilles non-identifiables et une fraction composée uniquement des coquilles identifiables. Le comptage consiste à identifier, pour chaque taxon, le nombre minimum d'individus en ajoutant aux coquilles entières l'amalgame des apex et des ouvertures. On considère qu'un échantillon est statistiquement représentatif quand il dépasse 200 individus (Evans, 1972). L'ensemble des comptages est ensuite représenté par un diagramme de distribution en fonction des enregistrements stratigraphiques. Les sédiments de Naachtun sont également riches en oogones fossiles de Characeae. Nous avons décidé d'évaluer leur richesse relative dans nos échantillons malacologiques en raison de leur capacité à signer les conditions hydriques de plans d'eau stagnants (Soulié-Märsche, 2002)

b). Faune actuelle de gastéropodes

La détermination taxonomique des coquilles fossiles ne peut reposer que sur les caractères conchyliologiques. Un relevé taxonomique et écologique des mollusques terrestres et d'eau douce a été mené en 1937 par Goodrich et Van der Schalie dans la région du Petén. D'autres missions dans les basses-terres centrales ont permis d'améliorer les listes d'espèces de la région (Basch, 1959 ; Dourson et Caldwell, 2018). La taxonomie retenue dans ce travail respecte la liste établie par Thompson (2011) sur le Mexique et l'Amérique centrale.

Parmi les espèces communes des zones d'*aguadas*, de marais, de *bajo* et de *Sival* relevées par Goodrich et Van der Schalie (1937) et par Basch (1959) à Tikal, 5 formes sont majoritaires dans les assemblages malacologiques récoltés à Naachtun. Elles correspondent toutes à des espèces de gastéropodes aquatiques.

La première forme trouvée correspond à l'espèce *Pomacea flagellata* (Plt 5.1 n-p), un ampullaire de grande taille pouvant atteindre 5cm de hauteur et à la variabilité morphologique importante (Goodrich et Van der Schalie, 1937). Il s'agit d'un organisme amphibie vivant à la fois dans le plan d'eau et sur sa marge (Naranjo-García et Olivera-Carrasco, 2014) et dont les coquilles jonchent le sol des *bajo* (Basch, 1959). Il est souvent trouvé dans les contextes ar-

chéologiques du Petén pour des raisons culinaires (Moholy-Nagy, 1978). En revanche, étant donné sa grande taille, les coquilles fossiles sont très rarement conservées entières dans les sédiments.

Les 4 autres formes correspondent toutes à des coquilles millimétriques.

Parmi celles-ci, on retrouve l'espèce *Cochliopina infundibulum* (Plt 5.1a-d). La coquille est particulièrement reconnaissable par sa forme aplatie et une ornementation à plusieurs carènes. L'espèce est fréquente comme organisme sub-fossile mais plus rare dans l'actuel (Goodrich et Van der Schalie, 1937 ; Covich, 1976 ; Kim et Rejmánková, 2002). Les travaux sur les indicateurs écologiques des zones ripariennes du Tabasco menés par Loreto (2011) considèrent *C. infundibulum* comme une espèce type des paysages de marais.

Deux autres formes peuvent être rattachées à la même famille des Cochliopidaeae. La plus remarquable correspond à une coquille conique de taille millimétrique dotée d'une carène épineuse. Dans la littérature sur les basses-terres, elle est généralement assignée à l'espèce *Pyrgophorus coronatus* (Plt 5.1 e-g). Toutefois, les travaux récents de Grego et al. (2019) décrivent une forme moderne du Yucatán, plus petite et pyramidale à carène épineuse, sous le nom de *Pyrgophorus thompsoni*. Les juvéniles de *P. coronatus* possèdent déjà des carènes épineuses et rendent difficile l'identification de possibles formes de *P. thompsoni* dans nos comptages. Nous observons une très grande variabilité dans l'expression des carènes, certaines coquilles ne présentant que de rares épines sur la spire voire l'absence totale de carènes chez ces deux espèces de *Pyrgophorus* sp. (Covich, 1976 ; Grego et al., 2019). Ce type de variation d'ornementation est connu chez d'autres espèces de *Pyrgophorus* sp. en Amérique latine (Nava et al., 2011). Cette variabilité est supposée être en lien avec des modifications de conditions écologiques comme la salinité, la présence de prédateur, la disponibilité en oxygène dissous (Covich, 1976 ; Vermeij et Covich, 1978 ; Bradbury et al., 1990). Il est difficile de répartir ces coquilles en différentes espèces sur des caractères conchologiques. Ainsi dans ce travail, ces types de coquilles sont comptabilisés comme *Pyrgophorus* sp.. Cependant, l'intérêt écologique supposé des variations d'ornementation chez ce genre nous a incité à dénombrer différemment les formes lisses (Plt 5.1 h-j) et épineuses (Plt 5.1 e-g).

La dernière forme correspond à des coquilles à spire plate de la famille des Planorbidae. La plupart des formes identifiées correspondent à des juvéniles et l'assignation aux formes adultes en est compliquée. Parmi les espèces présentes dans le Petén et qui pourraient correspondre aux formes adultes, on retrouve *Biomphalaria havanensis*, *Biomphalaria obstructa*, *Biomphalaria petenensis*, *Planorbella trivolvris* (Plt 5.1k-m). Aux vues des incertitudes liées aux échantillons disponibles, ces formes sont comptabilisées comme planorbes. Il s'agit d'organismes d'eau douce fréquents dans tous les milieux aquatiques (Goodrich et Van der Schalie, 1937).

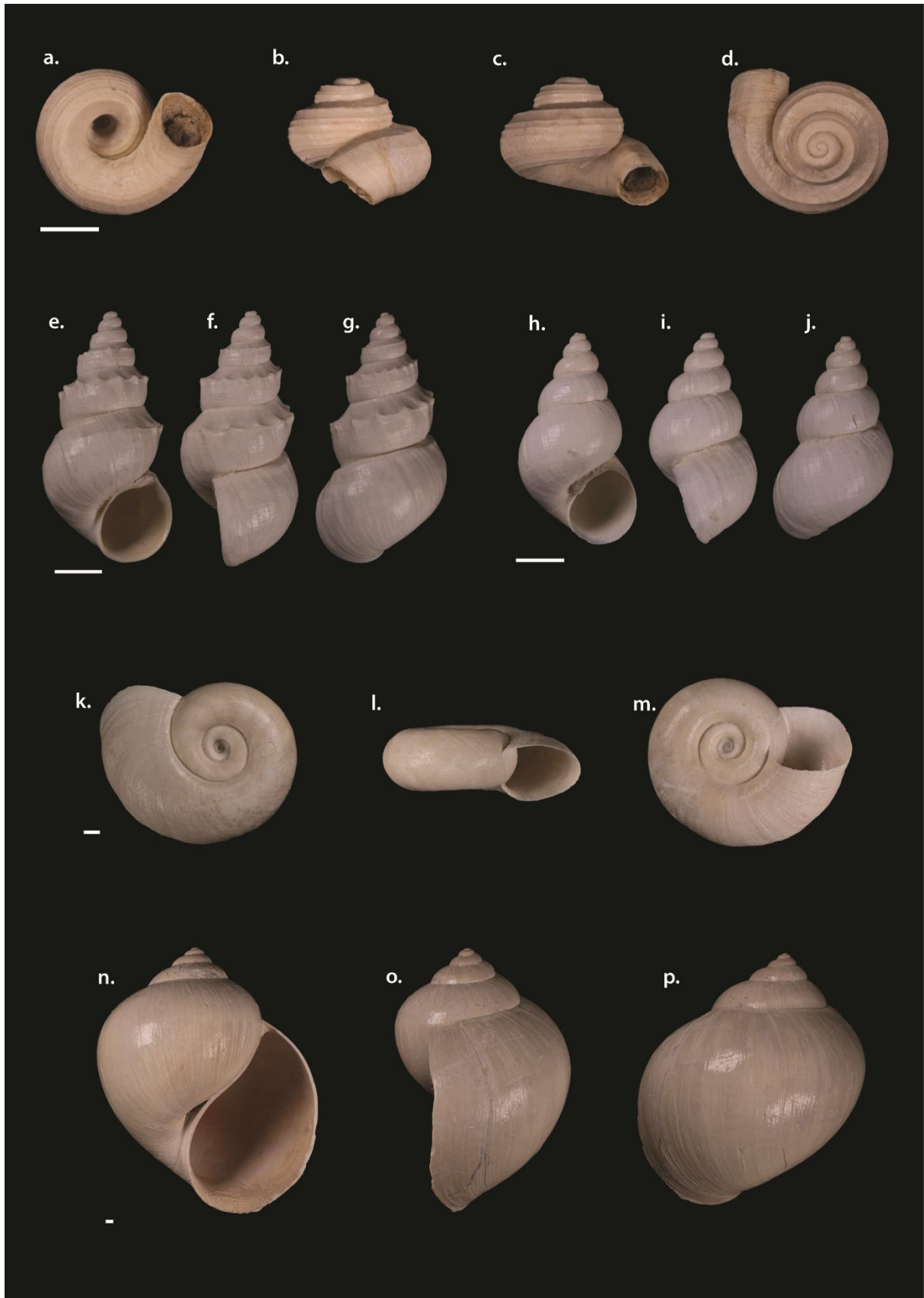


Planche 5.1 – Photographie sous différentes vues des principales coquilles fossiles trouvées dans les sédiments de Naachtun. a-d = *Cochliopina infundibulum* ; e-g = *Pyrgophorus coronatus* forme épineuse ; h-j = *Pyrgophorus coronatus* forme lisse ; k-m = Planorbidae ; n-p = Pomacea flagellate. Barre d'échelle = 1 mm ; (Photographie réalisée par Pierre Lozouet)

Ces 5 formes (Plt 5.1) représentant la quasi-totalité des effectifs des assemblages, les rares coquilles appartenant à d'autres espèces ont des occurrences limitées et seront traitées sous la forme « autres espèces » dans nos comptages.

IV. Les écosystèmes passés étudiés par les phytolithes et les bioindicateurs siliceux

1. Étude du sondage M2S1

L'étude du sondage M2S1 est composée de 20 échantillons de phytolithes (Fig 5.3).

L'ensemble M2-E3 (S1-US12 à S1-US10) est dépourvu de phytolithes et de bioindicateurs. Cette absence pourrait résulter de conditions de dépôts ou de diagenèse défavorables à la conservation des restes siliceux.

Les S1-US9 et S1-US8 à la base de l'ensemble M2-E2 forment une première phase (S1-P8) où les assemblages de phytolithes sont dominés par 45% à 51% de *Globular mixed* témoignant d'une part importante de ligneux dans l'écosystème (Fig 5.3). Les valeurs de *GSCP* cumulées atteignent jusqu'à 32%, dont 14 à 17% de *Bilobate* tandis que les *Papillae* ne dépassent pas 8%. Cette composante herbacée de l'assemblage est également soutenue par les valeurs d'indice D/P légèrement supérieures à 1 et par les valeurs de l'indice LU inférieures au seuil de 0,25 qui indiquent un écosystème mixte. Enfin, on note des valeurs de spicules d'éponges supérieures à 30% et des taux résiduels de diatomées, caractéristiques de milieux humides temporaires. Ce type d'assemblage est comparable aux assemblages des environnements de *Tintal* de Naachtun, c'est-à-dire une forêt, avec une strate herbacée périodique, immergée saisonnièrement en raison de sa proximité avec un plan d'eau pérenne.

Le S1-US7 présente un assemblage où le taux de *Globular mixed* a diminué à 30% et où les valeurs de *GSCP* sont semblables à la phase précédente (31%) (Fig 5.3). Sur cette phase S1-P7, en revanche, les *Papillae* atteignent des valeurs de 25% de l'assemblage. Il semble que cet environnement soit un peu plus ouvert et humide que la phase S1-P8. Ceci est confirmé par des valeurs d'indice D/P légèrement inférieures à 1. Toutefois, l'indice LU, toujours inférieur à 0,25, fait toujours état d'un milieu avec une composante arborée. Les valeurs des phytolithes et des bioindicateurs ont peu évolué sur cette phase, les spicules d'éponges dépassent toujours les 25% et les diatomées augmentent à 5%. Il est possible d'interpréter cet assemblage comme la présence d'une zone de *Sival*, une zone humide pérenne dominée par des assemblages d'herbes, en bordure de forêt ou d'une zone de *Tintal* soumise à une zone humide plus proche.

La phase suivante S1-P6 recouvre les S1-US6 et S1-US5 (Fig 5.3). L'assemblage est caractérisé par des taux de *Globular mixed* supérieurs à 70%, associés à une forte diminution des valeurs de *GSCP* (> 12%) et de *Papillae* (>5%). Ces valeurs indiquent clairement la présence d'un écosystème forestier dense. L'originalité de ces échantillons réside dans la présence résiduelle du morphotype *Globular faceted* qui atteste de la présence de Cucurbitaceae.

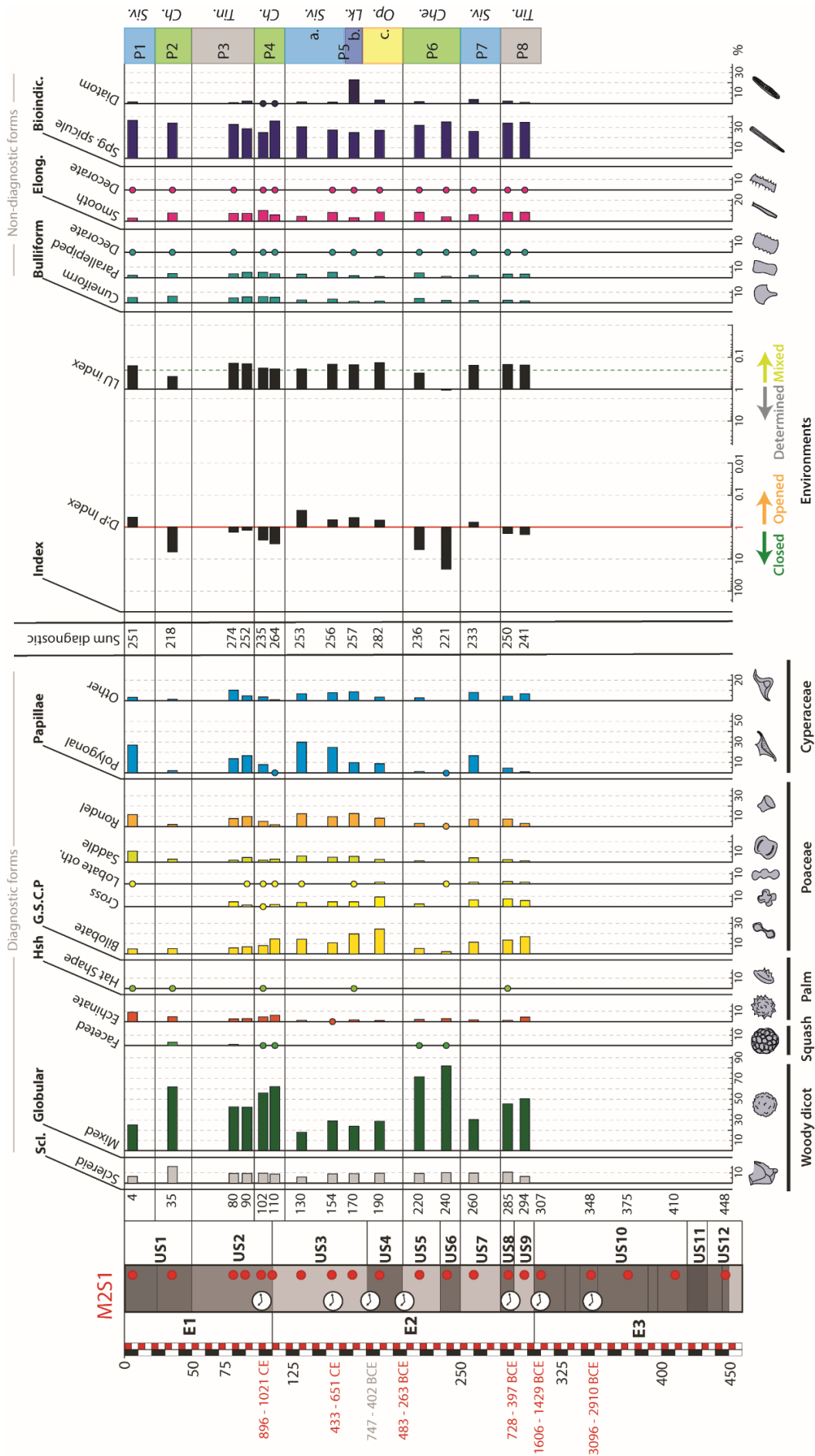


Figure 5.3 – Diagramme de distribution des morphotypes de phytolithes diagnostiques, non diagnostiques et microfossiles siliceux du sondage M2S1. Identification de l'évolution temporelle des écosystèmes. Points rouges = échantillons prélevés sur le sondage pour l'études des phytolithes. Che. = Chechemal ; Lk. = Lac ; Op. = Végétation ouverte ; Tin. = Tintal ; Siv = Sival

Les valeurs de l'indice D/P oscillent entre 8 et 11 tandis que les valeurs de l'indice LU sont supérieures au seuil de 0,25, confirmant la domination des ligneux dans l'écosystème. On retrouve toujours des taux de spicules d'éponges entre 32 et 36% et des valeurs très faibles de diatomées (> 2%), indiquant la présence d'eau au moins une partie de l'année. Ce type d'assemblage est identique aux assemblages des écosystèmes modernes de *Chechemal*, c'est-à-dire une forêt basse de marais sans sous-bois et soumise à de courtes inondations saisonnières.

Les US terminales de l'ensemble M2-E2 (S1-US4 et S1-US3, à l'exception de S1-110) forment une phase S1-P5 dont les variations dans l'assemblage montrent un écosystème en évolution (Fig 5.3). On observe des valeurs de *Globular mixed* qui oscillent entre 24 et 29% avant de tomber à 18% sur l'échantillon S1-130. Les valeurs de *GSCP* varient entre 30 et 47% dont celle maximale est atteinte pour l'US4 (S1-190) où les *Bilobate* et les *Cross* composent respectivement 23% et 10% de l'assemblage. Ces fortes proportions de morphotypes, souvent associés aux Panicoideae (Fredlund et Tieszen, 1994 ; Barboni et Bremond, 2009), n'ont pas été observées dans les échantillons modernes de Naachtun (Testé et al., 2020). Les taux de *Papillae* augmentent progressivement au cours de cette phase depuis 12% à S1-190 jusqu'à atteindre un taux de 37% sur la partie supérieure de l'S1-US3 (S1-130). Ces assemblages montrent des milieux plutôt ouverts à dominantes herbacées. Cette analyse est confirmée par les valeurs de l'indice D/P qui sont toutes inférieures à 1. Les valeurs de l'indice LU, toutes inférieures à 0,25, indiquent cependant la présence d'une composante arborée dans cette formation ouverte. Concernant les spicules d'éponges, on retrouve des valeurs variant de 25% à 31% alors que les diatomées restent inférieures à 4%, à l'exception d'un pic à 23% à la base de l'US3 (S1-170). Cette phase correspondrait à un écosystème ouvert où l'augmentation des Cyperaceae sur les Poaceae indiquerait une augmentation de l'humidité du milieu jusqu'à ressembler à un écosystème proche des *Sival* modernes. Cette phase S1-P5 pourrait être découpée en trois événements, S1-P5c représentant une zone ouverte avec des communautés herbacées non connues dans l'actuel à Naachtun, une phase de zone humide étendue indiquée par les fortes proportions de diatomées S1-P5b et enfin, une zone de *Sival* S1-P5a.

Le S1-US2 est étudié par 4 échantillons qui forment 2 phases végétales (Fig 5.3). La première S1-P4 (qui comprend également la partie sommitale de S1-US3 avec l'échantillon S1-110) se résume par de forts taux en *Globular mixed* (> 56%), des valeurs moyennes en *GSCP* (entre 16% et 21%) et en *Papillae* (entre 2 et 11%). On note, une nouvelle fois, la présence de phytolithes de type *Globular faceted*. Les valeurs de l'indice D/P sont supérieures à 2,5, indiquant plutôt un milieu fermé, mais celles de l'indice LU, légèrement inférieures à 0,25, indiquent plutôt un environnement mixte. Les spicules d'éponges conservent des valeurs hautes entre 25 et 36% et les diatomées sont peu représentées (>1%). Cet assemblage est relativement semblable à ceux des forêts modernes de *Chechemal* et à ceux de la phase S1-P6, permettant d'interpréter l'écosystème de la phase S1-P4 également comme une forêt basse de *bajo*. Pour la phase suivante S1-P3, les *Globular mixed* diminuent à 42% des assemblages et les *Globular faceted* sont absents. A l'inverse, les *GSCP* restent stables autour de 21% tandis

que les *Papillae* augmentent jusqu'à 21% et 24% des assemblages. Cette augmentation de la composante herbeuse dans les assemblages est corrélée à une baisse des valeurs de l'indice D/P autour de 1 mais ne correspond qu'à une stabilisation des valeurs de spicules d'éponges (38 à 42%) et des diatomées (1 à 3%). Ces variations dans la présence d'herbes, notamment de Cyperaceae, laisse penser au remplacement d'une forêt de *bajo* de type *Chechemal*, en une forêt plus hydrophile de type *Tintal*.

La base de l'S1-US1 forme la phase S1-P2 dont l'assemblage correspond en tout point à la phase S1-P4 et S1-P6 (Fig 5.3). Elle est constituée de 60% de *Globular mixed*, de 10% de *GSCP* et 4% de *Papillae* et présente des *Globular faceted*, des valeurs hautes d'indice D/P (>5) et LU (>0,40) ainsi que des spicules à hauteur de 35% quand les diatomées sont résiduelles. Ce type d'assemblage est associé aux forêts basses de *bajo* de type *Chechemal*.

Enfin, pour la partie terminale de l'S1-US1 (S1-4), la phase correspondante S1-P1 présente des valeurs de *Globular mixed* de 25% associées à des valeurs de *GSCP* et de *Papillae* atteignant respectivement 28% et 30% (Fig 5.3). Alors que les *GSCP* sont dominés par les morphotypes de *Saddle* et *Rondel* (22%), ce sont les formes polygonales de *Papillae* qui dominent (27%). Ce type d'assemblage est similaire aux assemblages d'écosystème aquatique moderne de type *Sival*.

2. Étude du sondage M2S10

i). Étude générale des assemblages fossiles

L'étude du sondage M2S10 est composée de 23 échantillons (Fig 5.4).

Le S10-US8 à la base du sondage présente deux échantillons qui forment la phase S10-P9 dominée par au moins 75% par des *Globular mixed* et associée à des taux résiduels de *Globular faceted* (Fig 5.4). Les morphotypes *GSCP* représentent moins de 10% des assemblages et les *Papillae* sont absents. Les valeurs de l'indice D/P sont supérieures à 9 et celles de l'indice LU sont supérieures à 0,45. Enfin, parmi les bioindicateurs, on retrouve les spicules d'éponges à hauteur de 30% des assemblages et des traces résiduelles de diatomées. Ce type d'assemblage est identique aux assemblages d'environnement de forêt de *bajo* de type *Chechemal*.

Le S10-US7 montre une évolution S10-P8 où les *Globular mixed* diminuent à 42% tandis que les *GSCP* atteignent les 40%, dont 24% de *Bilobate* et que les *Papillae* atteignent 6% (Fig 5.4). Ce type d'assemblage indique la présence importante d'herbacées dans une zone forestière. Ainsi, l'indice D/P voit sa valeur diminuer vers la valeur repère 1 tandis que l'indice LU descend à 0,22 indiquant une communauté végétale mixte. Si les spicules d'éponges sont un peu moins présents avec des valeurs à 22%, les diatomées atteignent des valeurs plus importantes autour de 5%. On peut interpréter cet assemblage comme une zone mixte forestière avec une forte composante herbacée à proximité d'une zone aquatique. Toutefois, tout

comme la phase S1-P5, la présence de fortes valeurs de morphotypes *Bilobate* laisse penser que les communautés de Poaceae sont différentes des actuelles.

La base de l'S10-US6 continue dans cette dynamique d'ouverture avec la phase S10-P7 (Fig 5.4). Les *Globular mixed* ne représentent plus que 28% de l'assemblage alors que les *GSCP* montent à 60% de l'assemblage, dont 38% de *Bilobate*. Les *Papillae* sont toujours très peu présents (2%) et les *Globular faceted* n'apparaissent plus dans l'assemblage. L'indice D/P prend une valeur inférieure à 1 (0,6) tandis que l'indice LU reste à une valeur inférieure à 0,25. Les spicules représentent 26% des particules comptées et les diatomées sont stables avec des valeurs aux alentours de 5%. Cette phase confirme l'ouverture de l'environnement, certainement dominé par des communautés de Panicoïdeae toujours dans un contexte aquatique périodique.

Les deux échantillons supérieurs de l'S10-US6 et l'échantillon basal de l'S10-US5 (S10-158) forment une phase évolutive des assemblages S10-P6 (Fig 5.4). Les *Globular mixed* restent stables au cours de cette phase, avec des valeurs assez faibles entre 20% et 23%. Les *GSCP* diminuent de 60% à 56% au cours de cette phase, passant d'une domination des *Rondel* (34% à 13%) aux *Bilobate* (17% à 25%) quand les *Saddle* restent relativement stables (entre 7% et 12%). Les *Papillae* suivent également une évolution graduelle en passant de 16% à 12%. L'indice D/P présente des valeurs bien inférieures à 1, en revanche, l'indice LU reste stable avec des valeurs moyennes à 0,21. Les spicules d'éponges restent relativement stables avec des valeurs sensiblement identiques à la phase précédente (entre 22% et 26%). L'évolution graduelle de la phase est également bien marquée par l'augmentation successive des taux de diatomées qui passe de 8% à 35%. Les fortes valeurs de *Rondel* et de *Papillae* au cours de cette phase correspondent bien à un environnement moderne de *Sival*. Toutefois, les valeurs importantes en diatomées et le retour de phytolithes associés aux Panicoïdeae pourraient montrer plutôt l'installation d'une zone humide plus pérenne avec une végétation herbeuse différente que les *Sival* actuels.

La phase suivante S10-P5 s'étale sur l'S10-US5 jusqu'à l'échantillon S10-138. L'assemblage de cette phase présente des taux de *Globular mixed* assez faibles entre 14% et 22% (Fig 5.4). A l'inverse, les *GSCP* dominent l'assemblage à hauteur de 68% à 73%, dont 37% en moyenne sont des *Bilobate*. Les *Papillae* sont assez peu présents, représentant en moyenne 5% des assemblages. L'indice D/P est fortement inférieur à 1 (de 0,2 à 0,4) dans cette phase alors que les valeurs d'indice LU sont en moyenne égale 0,25. Sur cette phase, la formation végétale dominante correspond à une savane dominée par les Panicoïdeae. Une grande variation intervient avec une diminution importante des taux de spicules dont les valeurs sont inférieures à 6% et qui sont remplacées par les diatomées dont les taux augmentent de 37% à 56%. Les phytolithes constituent, ici, une formation à dominante herbacée tandis que les diatomées indiquent une dimension plus importante du plan d'eau. Ainsi, l'assemblage pourrait correspondre à une zone humide à la végétation très différente des zones modernes de *Sival*.

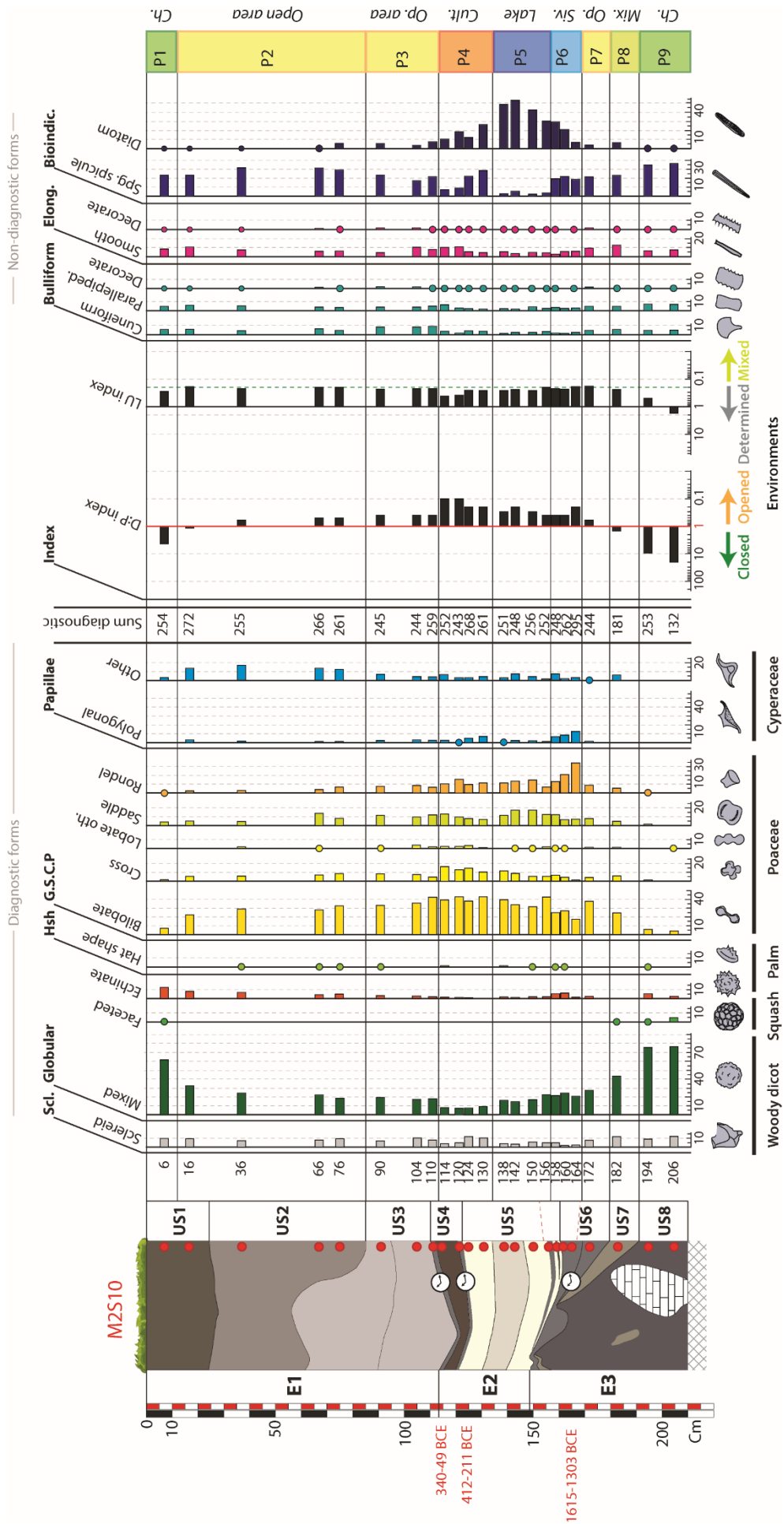


Figure 5.4 – Diagramme de distribution des morphotypes de phytolithes diagnostiques, non diagnostiques et microfossiles siliceux du sondage M2S10. Identification de phases marquant l'évolution temporelle des écosystèmes. Points rouges = échantillons prélevés sur le sondage pour l'études des phytolithes. Che. = Chechemal ; Cult = zone cultivée ; Lk. = Lac ; Ope, area. = Végétation ouverte ; Siv = Sival

La partie sommitale de l'S10-US5 et de l'S10-US4 correspond à une nouvelle phase S10-P4 (Fig 5.4). Dans ces assemblages phytolithiques, les taux de *Globular mixed* présentent les valeurs minimales de la coupe, entre 7% et 9%. A l'inverse, les morphotypes de *GSCP* représentent au minimum 71% des assemblages dont en moyenne 40% pour les *Bilobate* alors que les *Cross* atteignent des valeurs deux fois supérieures par rapport aux autres phases, allant de 10% à 16%. Les *Papillae* sont toujours assez faiblement représentés, avec une valeur moyenne inférieure à 7%. Les valeurs de l'indice D/P sont minimales avec des valeurs de 0,1 à 0,2 et les valeurs de l'indice LU sont légèrement supérieures à 0,25, augmentant jusqu'à 0,4. Les valeurs des spicules d'éponges et de diatomées évoluent au cours de cette phase. Les spicules, malgré une réapparition dans ces échantillons, ont des valeurs qui passent de 21% à 9% au cours de cette phase quand les diatomées suivent le même phénomène, passant de 30% à 13%. L'écosystème est clairement dominé par les herbacées y compris les Panicoïdeae, dont les fortes proportions de *Cross* pourraient faire penser à la présence de maïs (cf. 4.2.2). La diminution des taux de spicules et de diatomées pourrait indiquer une diminution de l'eau disponible dans le milieu au cours de cette phase, tout en indiquant tout de même une phase d'eau pérenne.

L'échantillon supérieur de l'10-US4, S10-110, marque cependant l'entrée dans une nouvelle phase S10-P3 qui encadre également l'S10-US3 (Fig 5.4). Les *Globular mixed* remontent à des valeurs de 17% à 19% alors que les *GSCP* tendent à diminuer de 66% à 60% au cours de cette phase, les *Bilobate* suivent cette tendance et passent de 41% à 34%. Les *Papillae* sont toujours assez peu présents même si l'on note une légère augmentation de 6% à 10%. Ainsi, les valeurs D/P augmentent mais restent toujours fortement inférieures à 1 (0,3 à 0,4) tandis que les valeurs de l'indice LU diminuent légèrement sous la valeur seuil (0,21-0,22). Au cours de cette phase, alors que les spicules d'éponges augmentent de 25% à 30% de l'assemblage, les diatomées continuent de diminuer et passent de 9% à 5% de l'assemblage. Le milieu correspond toujours à une zone ouverte à Panicoïdeae mais la diminution des taux de diatomées au profit des spicules d'éponges laisse à penser que le plan d'eau continue de diminuer pour prendre un régime plus proche des zones de *Sival* modernes.

Le S10-US2 et la base de l'S10-US1 correspondent à la phase S10-P2 dont les assemblages évoluent (Fig 5.4). Les *Globular mixed* passent graduellement de 19% à 32% tandis que les valeurs de *GSCP* diminuent de 55% à 34% toujours dominées par les *Bilobate* (de 33% à 22%). Les *Papillae* vont atteindre en moyenne 15% des assemblages mais les principaux morphotypes n'appartiennent pas aux formes polygonales mais plutôt à des formes lisses ou multiples (Testé et al., 2020). Il semble y avoir, lors de cette phase, une composante plus arborée dans un écosystème ouvert avec une modification dans les communautés de plantes herbacées où les Cyperaceae sont présentes avec les Panicoïdeae. Le caractère ouvert de l'écosystème est confirmé par les valeurs d'indice D/P qui restent inférieures à 1 (de 0,4 à 0,8) tandis que la composante arborée du milieu se corrèle bien avec les valeurs de l'indice de mixité des milieux LU et des valeurs fortement inférieures à 0,25 (de 0,20 à 0,16). Le taux de spicules diminue également au cours de cette phase passant de 36% à 28%. Dans le même temps, les diatomées passent sous les 1% de l'assemblage. La variation de ces

bioindicateurs semble confirmer une dynamique de diminution du plan d'eau déjà observée dans les phases précédentes.

La dernière phase S10-P1 correspond à l'échantillon supérieur du S10-US1 (Fig 5.4). Les *Globular mixed* présentent une valeur de 62% et sont une nouvelle fois en association avec les *Globular faceted*. La somme des *GSCP* atteint 13% et les *Papillae* ne représentent que 3% de l'assemblage. L'indice D/P donne une valeur de 4 et la valeur de l'indice LU est de 0,29. Les spicules restent stables à 29% et les diatomées représentent moins de 1% de l'assemblage. Nous rapprochons ces données à une forêt moderne basse de type *Chechemal*.

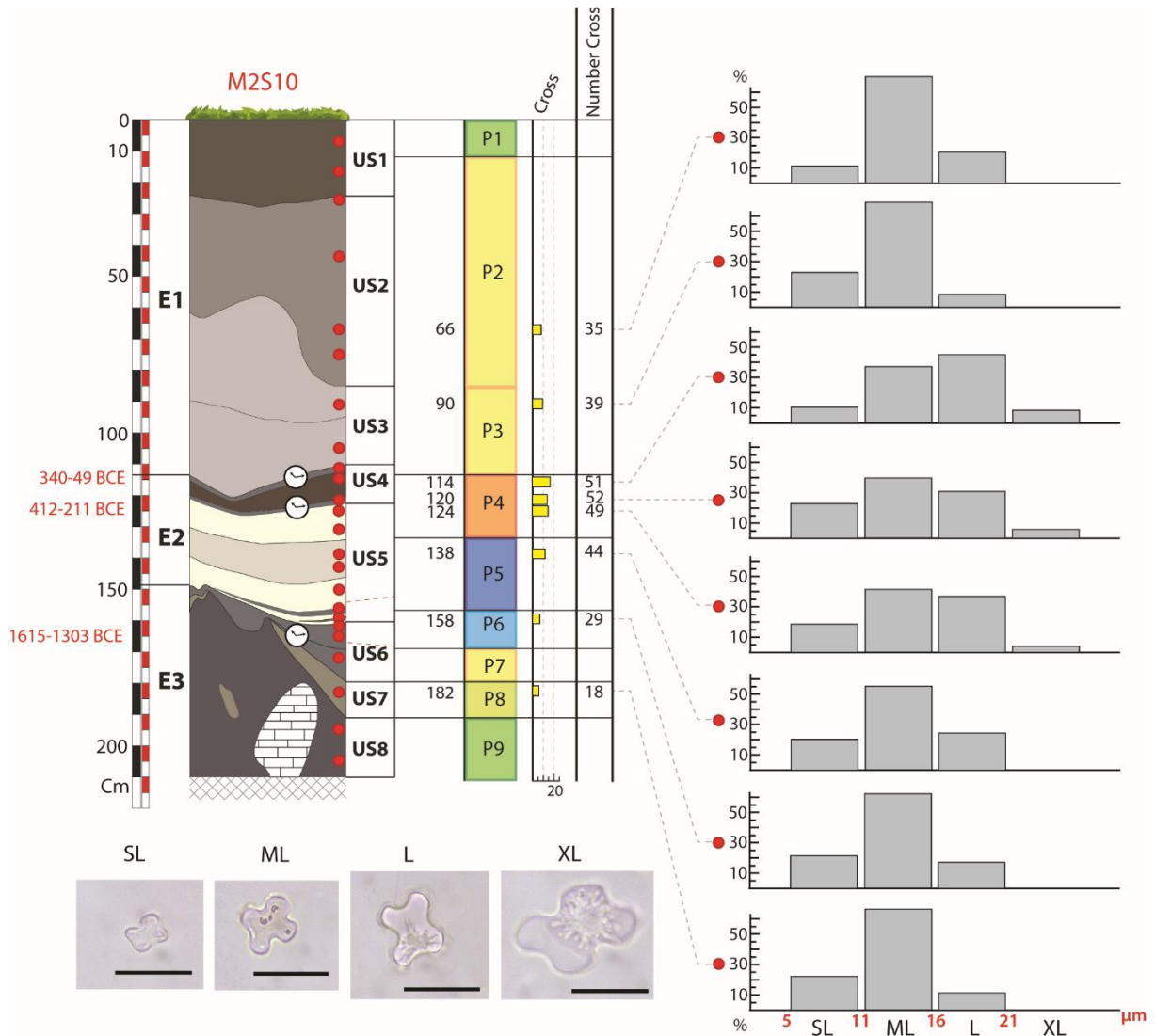


Figure 5.5 – Distribution des classes morphométriques de morphotypes *Cross* au sein de 8 échantillons du sondage M2S10. Le morphotype XL, supérieur à 21 µm est interpréter comme indicateur de maïs.

ii). Distribution morphométrique des *Cross*

En raison des fortes proportions des morphotypes *Cross* sur le sondage M2S10, il a été possible d'étudier la répartition de leurs types morphométriques (Fig 5.4). 8 échantillons ont été

testés sur les S10-US7 à S10-US2, avec un comptage moyen de 39 morphotypes de *Cross* par échantillon (Fig.5.5).

Les *Cross* de l'S10-US7 à l'S10-US5 sont majoritairement dominés par des morphotypes de taille ML à plus de 50%. Les morphotypes SL représentent en moyenne 20% des *Cross* de ces unités alors que les formes L sont inférieures à 20% et les XL sont absentes. Toutefois, sur l'échantillon de l'S10-US5, les valeurs des formes L et SL s'égalisent autour de 20%.

La partie supérieure de l'S10-US5 et du S10-US4 correspondent à la phase S10-P4 qui présente le plus grand nombre de *Cross* dans ses assemblages (Fig 5.5). Trois échantillons y ont été étudiés. Dans ceux-ci, les cortèges de *Cross* présentent une distribution de morphotypes différents. Les formes SL sont toujours inférieures à 20%. On voit une évolution des formes ML à la baisse, descendant en dessous de 35% alors que les morphotypes L dépassent les 40%. Il s'agit des seuls niveaux où un taux résiduel de formes XL, associé au maïs, est présent (de 4% à 8%).

Les S10-US3 et S10-US2 sont représentés par deux échantillons qui exposent des valeurs maximales pour les formes ML, dépassant les 60% alors que les formes SL et L sont toujours inférieures à 20% des assemblages de *Cross*. Les morphotypes XL sont absents de ces assemblages.

Sur la base de ces résultats (Fig 5.5), seule la phase S10-P4 présente des indices de culture du maïs parmi le signal des Panicoidae. Ce niveau correspond par ailleurs à un paléosol et les taux importants de spicules et de diatomées laissent penser que cette agriculture s'est déroulée dans un milieu relativement humide (Fig 5.4).

3. Étude du sondage sédimentaire M1S2c

L'étude des phytolithes du sondage M1S2c repose sur 20 échantillons (Fig. 5.6). L'unité basale S2-US8 n'a pas été étudiée. La S2-US7 est partiellement étudiée à partir de 8 échantillons basaux qui forment la phase S2-P4. Les *Globular mixed* représentent en moyenne 26% des assemblages, avec des valeurs étalées entre 17% et 32%. On note la forte présence de *Sclereid* avec des valeurs moyennes de 20%, dont des pics à 40% sur l'échantillon basal de la phase. Si les *Globular echinate* enregistrent des taux faibles comparables aux sondages de la section ouest (en moyenne 6%), cette phase est la seule à présenter des taux de *Hat shape* aussi importants (jusqu'à 9 %). En moyenne, les *GSSCP* représentent 32% des assemblages, avec une domination des *Bilobate* et des *Saddle* à hauteur de 15% et 9%. Les *Papillae*, dominés par les morphes non-polygonaux, ont des valeurs qui varient de 15% pour les échantillons basaux et sommitaux de la phase à des valeurs de 6% pour sa partie médiane. Toutefois, les fortes valeurs de *Papillae* de type non-polygonal laissent à penser que les communautés de Cyperaceae sont différentes de celles trouvées dans les zones modernes de *Sival*.

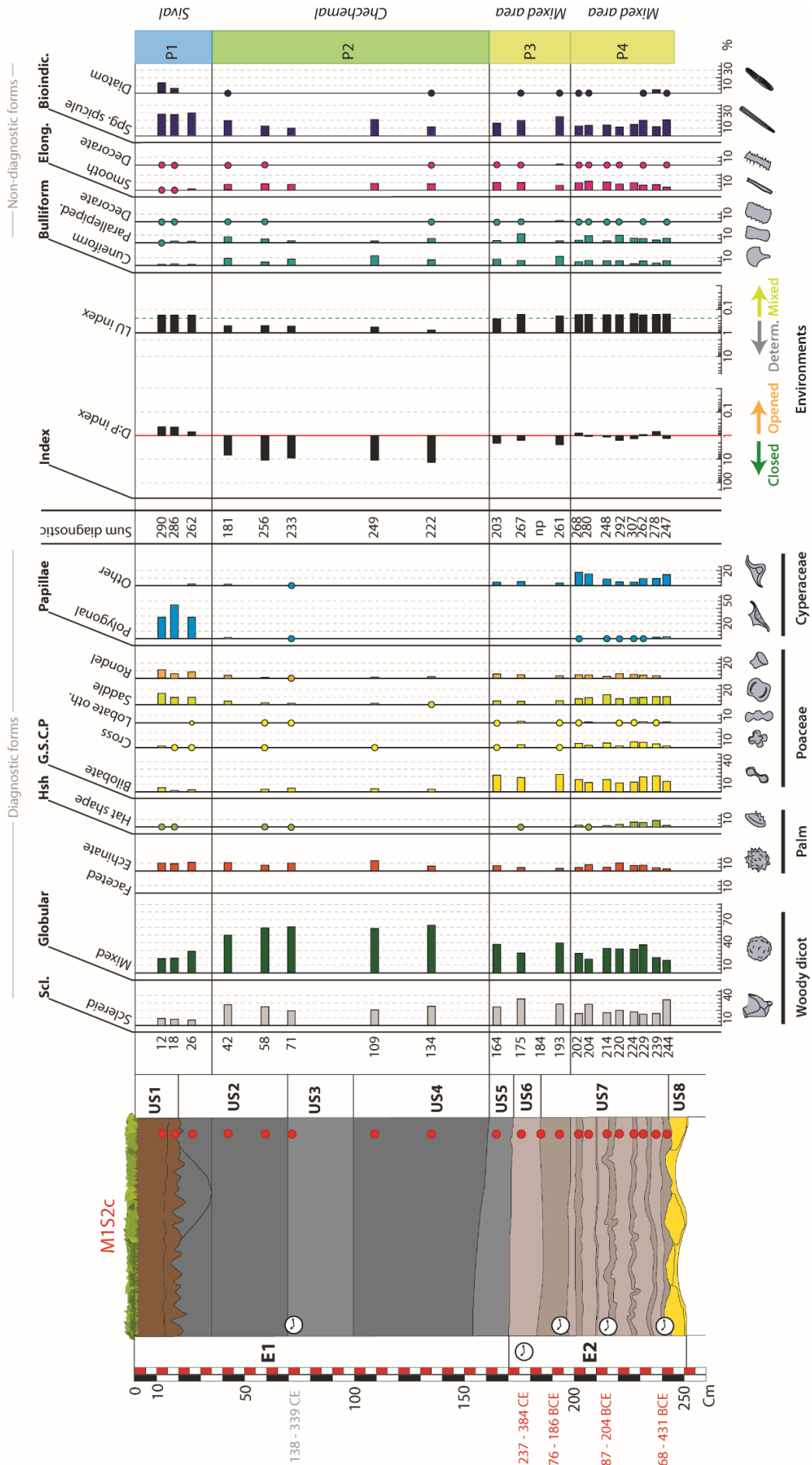


Figure 5.6 – Diagramme de distribution des morphotypes de phytolithes diagnostiques, non diagnostiques et microfossiles siliceux du sondage M152c. Identification de phases marquant l'évolution temporelle des écosystèmes. Points rouges = échantillons prélevés sur le sondage des phytolithes. Che. = Chechemical ; Cult = zone cultivée ; Lk. = Lac ; Ope, area. = Végétation ouverte ; Siv = Sival

Sur la base de ces assemblages, l'écosystème correspondant à la phase S2-P4 pourrait être interprété comme une savane forestière ou une forêt avec un important sous-bois herbacé. Ces assemblages pourraient également correspondre à une zone de transition entre une communauté forestière venue du versant et une composante herbeuse composée de *Panicoidae* et *Cyperaceae* certainement originaire des zones de *bajo*. Ces analyses sont confirmées par les valeurs de l'indice D/P qui varient entre 0,7 et 2,3 avec une valeur moyenne de 1,1 tandis que l'ensemble des valeurs de l'indice LU est inférieur à 0,25 (entre 0,16 et 0,19). Les spicules d'éponges représentent en moyenne 15% des particules alors que les diatomées sont résiduelles (>1%), indiquant la présence d'une zone humide à proximité mais dont l'action serait plutôt saisonnière, laissant l'écosystème émergé une grande partie de l'année.

La phase S2-P3 suivante est composée des échantillons prélevés dans les unités S2-U7 (échantillon supérieur S2-193), S2-U6 et S2-US5 dont les assemblages sont semblables à ceux de la phase S2-P4 (Fig. 5.6). En effet, les *Sclereid* et les morphotypes *Globular mixed* y sont toujours importants avec des valeurs moyennes respectives de 30 et 34%. Les *GSCP* ne représentent plus que 26% des assemblages, toujours dominés par les *Bilobate* à hauteur de 14% et les *Papillae* sont moins présents (> 5%), uniquement représentés par les morphotypes non-polygonaux. Cet assemblage pourrait marquer la fermeture progressive du milieu en lien avec un changement dans les communautés d'herbes. Cette hypothèse est confirmée par les valeurs d'indice D/P qui sont en moyenne égales à 2. Toutefois, la présence d'une population d'herbe est soulignée par les valeurs de l'indice LU toujours inférieures à 0,25 (de 0,17 à 0,24). Au cours de cette phase, le taux de spicules passe graduellement de 26% à 16% et les diatomées sont toujours rares (entre 0% et 0,2%). Ces valeurs, comparables à la phase S2-M3, indiquent toujours l'immersion saisonnière de l'écosystème.

La troisième phase S2-P2 de ce sondage recouvre les unités S2-US4 et S2-US3 et les deux échantillons basaux de S2-US2 (Fig. 5.6). Les valeurs de *Globular mixed* sont supérieures à 50% et, en moyenne, atteignent 58%. Les *Sclereid* sont toujours présents avec des valeurs moyennes de 23%. Ce sont les faibles valeurs de *GSCP* et de *Papillae* cumulés (> 12%) qui permettent d'affirmer que pour cette phase, l'écosystème est dominé par une forêt de *bajo* semblable aux communautés végétales modernes de *Chechemal*. Les valeurs prises par l'indice D/P dans cette phase sont, en effet, supérieures à 6 indiquant un milieu fermé riche en ligneux et les valeurs de l'indice LU sont également très supérieures à la valeur seuil de 0,25 (entre 0,52 et 0,77) indiquant un milieu clairement défini. Les spicules sont en moyenne moins représentés dans les assemblages avec une valeur de 15%, avec un maximum à 21% et les diatomées ne sont présentes que de manière résiduelle et ponctuelle (entre 0% et 0,3%). Ces données confirment la présence d'une forêt de *Chechemal* immergée seulement sur une courte période pendant l'année.

L'échantillon terminal de S2-US2 (S2-26) et l'unité S2-US1 forment la phase terminale S2-P1 (Fig. 5.6). Les assemblages de ces échantillons sont peu riches en *Globular mixed* avec une représentation moyenne de 22% et les valeurs de *Sclereid* chutent à 8%. Les *GSCP* présentent des valeurs moyennes de 24% en cumulé et sont dominés par les morphotypes de

Saddle (11%) et de *Rondel* (9%). Ce sont surtout les *Papillae* de type polygonal qui prennent une part importante de l'assemblage avec des valeurs comprises entre 29 et 44%. Ce type d'assemblage est caractéristique des milieux ouverts de *Sival* à Naachtun. L'indice D/P présente des valeurs inférieures à 1 (entre 0,4 et 0,7) qui confirment la présence d'un milieu ouvert tandis que l'indice LU possède des valeurs inférieures à 0,25 (0,18) qui indiquent la présence d'un couvert ligneux à proximité de la zone. Les spicules d'éponges remontent à des valeurs de 30% et les diatomées sont plus présentes avec des valeurs autour de 10%, confirmant la présence d'une zone d'eau plus pérenne cohérente avec la présence d'un *Sival*.

4. Confirmation statistique des assemblages de phytolithes

Les assemblages de phytolithes et de microfossiles siliceux des sondages sédimentaires ont été interprétés sur la base des assemblages modernes de ces bioindicateurs et de leurs valeurs respectives (Fig 5.3, 4 et 6). Une analyse statistique est nécessaire pour valider les regroupements d'assemblages fossiles en phases. Une première analyse, sous forme d'un cluster de similarité ou CAH (Classification Ascendante hiérarchique), a été réalisée afin de vérifier si les regroupements en type d'écosystème avaient une réalité statistique. L'indice de similarité *Horn* est celui qui maximise les regroupements construits initialement sur la base des assemblages (Fig 5.7).

L'étude du cluster nous permet de valider la cohérence de certains regroupements en phases voire en types d'écosystème. L'ensemble des échantillons associés à des phases de *Chechemal* est rassemblé en un seul groupe cohérent. A l'exception de l'échantillon S10-182, l'ensemble des échantillons classés comme « zone mixte » est également ordonné dans un même groupe et ceux-ci correspondent tous aux phases S2-P4 et S2-P3 du sondage M1S2c. De même, l'ensemble des échantillons du sondage M2S10 initialement classés comme « zone ouverte » ainsi que l'échantillon S10-182 forment un groupe qui rassemble les phases S10-P8, P7, P3 et P2 du sondage. En revanche, l'échantillon S1-190, classé initialement comme « zone ouverte », n'est pas inclus dans ce groupe. L'ensemble des échantillons de surface et sub-surface des sondages M1-S2c et M2S1 correspondant à un *Sival* moderne, est également regroupé en une classe cohérente dite *Sival*. Enfin, les échantillons interprétés comme des écosystèmes de *Tintal* sont rassemblés dans un même groupe. Dans ce dernier regroupement, on retrouve également les échantillons des phases S1-P7 et S1-P5 dont l'échantillon interprété comme « zone ouverte » S1-190. Ces échantillons, initialement décrits comme des zones de *Sival* ou ouvertes, sont plutôt classés comme cohérents avec les autres échantillons de type *Tintal* du sondage M2-S1. Ici, l'AFC confirme en partie la cohérence statistique de ce nouveau classement, les échantillons des phases S1-P7 et P5 pourraient être réinterprétés comme des zones de *Tintal* et non de *Sival*. Toutefois, ces mêmes niveaux se retrouvent également à proximité des calibrations modernes des environnements de *Sival*. De plus, sur les environnements actuels, il a été montré que les assemblages de

Tintal et de *Sival* se recoupent dans les tests statistiques (Testé et al., 2020). Il est donc possible de considérer le classement initial de ces échantillons comme valide.

La seconde partie de la CAH est relativement moins cohérente sur le lien entre les échantillons et les phases. Sur l'ensemble des échantillons interprétés comme des assemblages de lacs, on retrouve la phase S10-P5 et l'échantillon S1-170 (phase S1-P5b). Les quatre échantillons de la phase S10-P5 sont rassemblés en un groupe distinct, en revanche, l'échantillon S1-170 n'est pas intégré à ce groupe « lac ». Sur les quatre échantillons de la phase « culture » S10-P4, seuls deux échantillons forment également un groupe distinct (S10-114 ; S10-120), les deux autres étant intégrés avec S1-170 à un troisième et dernier groupe. Celui-ci, caractérisé comme « indéterminé », regroupe les trois échantillons non-intégrés à leur groupe respectif ci-dessus ainsi que deux échantillons initialement classés comme *Sival* de la phase S10-P6. Les fortes proportions conjointes de spicules d'éponges et de diatomées sont les seules caractéristiques distinctives de ce regroupement dont il faut vérifier la cohérence avec l'AFC. Enfin, l'échantillon S10-164 est isolé et n'a pas été assimilé à un groupe.

L'analyse, sous forme d'AFC, permet de localiser spatialement les différents groupes d'échantillons fossiles identifiés par la CAH. Afin de déterminer, également, si certains regroupements obtenus par la CAH sont analogues aux environnements modernes, des échantillons modernes de zone de *Chechemal*, de *Tintal* et de *Sival* de Naachtun (Testé et al., 2020) ont été ajoutés à l'AFC mais sans influencer sur la contribution des morphotypes fossiles à l'analyse.

L'axe 1 de l'AFC participe à 48% de l'analyse et permet une organisation première des échantillons. La richesse en diatomées contribue à attirer les échantillons qui en possèdent de fortes valeurs vers la partie négative de l'axe tandis que l'association *Globular mixed*- spicule d'éponge les attire vers la partie positive de l'axe. Cette première différenciation permet de positionner les échantillons de lacs (S10-P5) du sondage M2-S10 à l'extrémité négative de l'axe quand les échantillons de *Chechemal* sont tous regroupés vers l'extrémité positive de l'axe 1. La totalité des étalons modernes de *Chechemal* sont également positionnés sur l'axe de manière cohérente avec les échantillons fossiles.

Sur l'axe 2, qui participe à 16% de l'analyse, les échantillons sont organisés en fonction de leur richesse en *Papillae polygonal* et spicules d'éponges sur la partie négative et des morphotypes *elongate* pour la partie positive. Ainsi, les échantillons de *Tintal* et de *Sival*, modernes et fossiles, s'échelonnent sur la partie négative de l'axe. La plupart des autres échantillons se trouvent sur la partie positive de cet axe.

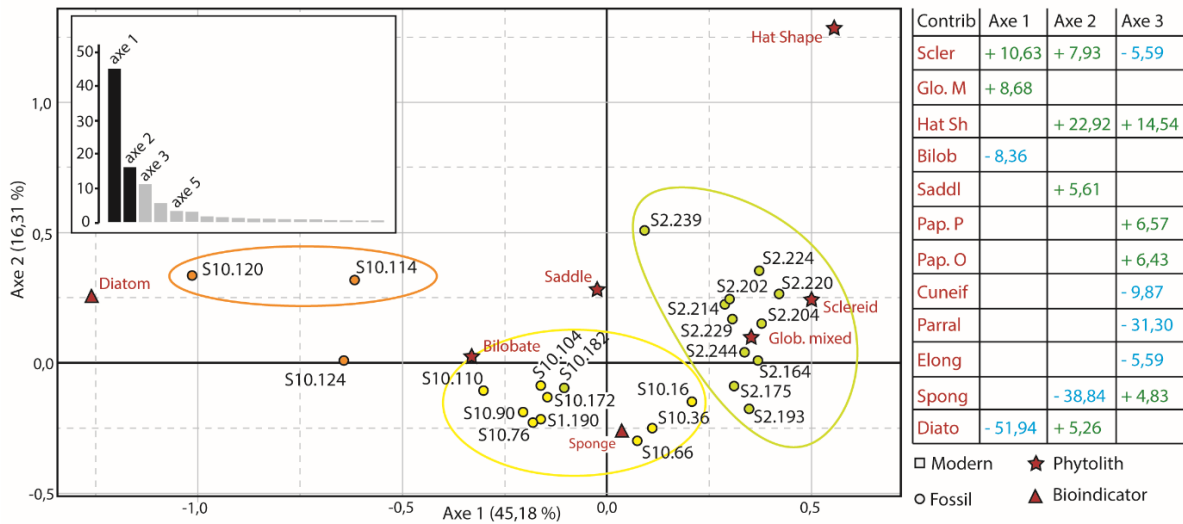
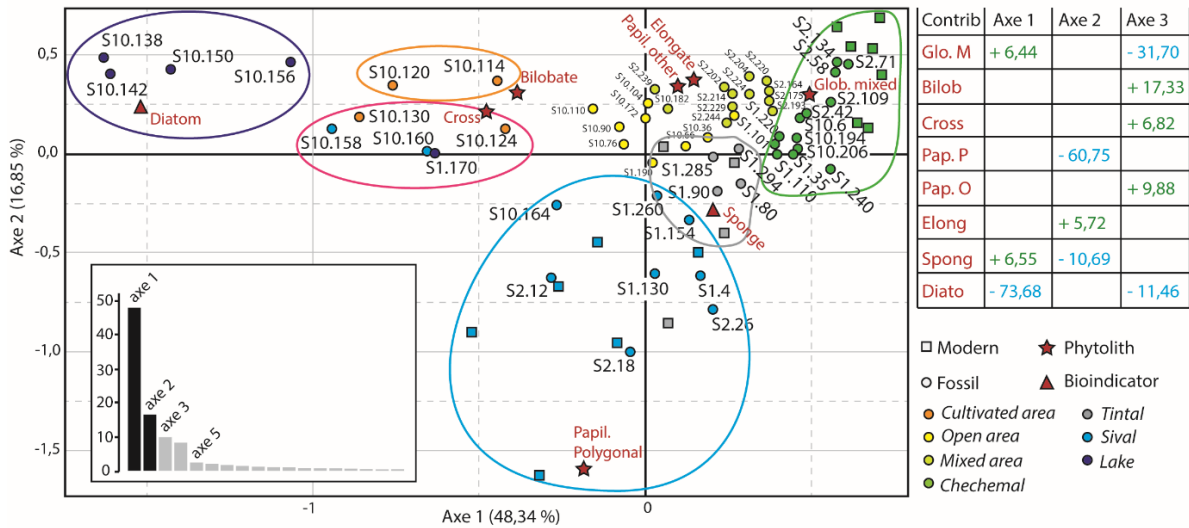
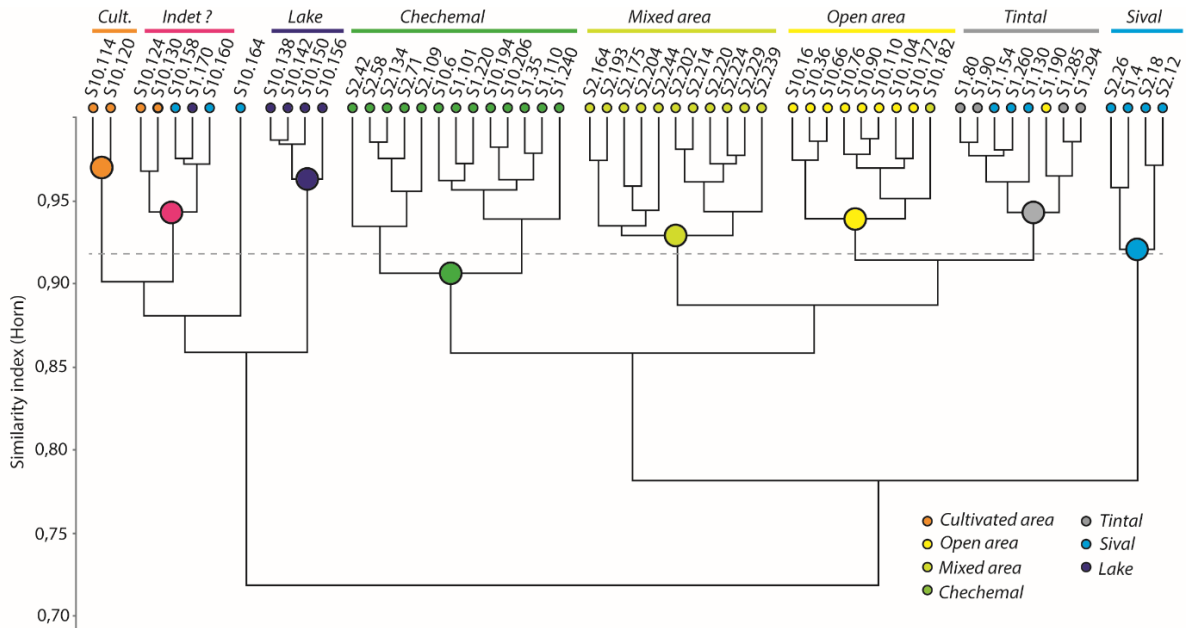


Figure 5.7 – Cluster obtenus à partir de la CAH (*indice horn*) des échantillons des séries sédimentaires. Représentations statistiques sous forme d'une AFC pour ces mêmes échantillons calibrés à partir des échantillons modernes prélevés depuis Testé et al. (2020).

L'analyse AFC permet de valider la plupart des groupes construits par la CAH. Les *Chechemal*, *Tintal* et *Sival* forment trois nuages de points distincts, calibrés par leurs analogues modernes. Les échantillons interprétés comme zone de lac, zone de culture et zone indéterminée forment également trois nuages de points bien distincts. Seuls les échantillons des zones mixte et ouverte sont trop imbriqués dans le nuage de points pour vraiment créer deux groupes. Une seconde AFC, ne regroupant que ces échantillons ainsi que les échantillons de zone cultivée, a été réalisée.

Sur cette seconde AFC ne regroupant que des échantillons fossiles, ceux interprétés comme zone cultivée sont bien différenciés sur la partie négative de l'axe 1 par la contribution des diatomées et des *Bilobate*. A l'inverse, les échantillons provenant des zones mixtes des phases S2-P4 et S2-P3 sont attirés par la contribution majoritaire des *Globular mixed* et des *Sclereid* sur la partie positive de l'axe. C'est la contribution des morphotypes *Hat shape*, *Sclereid* et *Saddle* qui participe à attirer ces mêmes échantillons sur la portion positive de l'axe 2, créant ainsi un regroupement distinct des échantillons des phases S10-P8, P7, P3 et P2 qui forment un autre groupe distinct.

La réalisation d'une analyse statistique AFC nous permet de considérer les groupements de la CAH comme cohérents et donne une réalité statistique à nos analyses initiales. Ainsi, les échantillons dits de la zone indéterminée sont certainement à interpréter comme un écosystème de zone humide différent de celui des *Sival* modernes. Cet écosystème humide et ouvert, dominé par les Panicoideae, se retrouve donc pour les phases S10-P6 et S10-P4 mais également sur le sondage M2-S1 et sa phase S1-P5b. L'échantillon S1-190, qui avait été classé par la CAH comme un environnement de *Tintal*, se retrouve dans la seconde AFC intégré au nuage de points des zones ouvertes comme il était initialement classé. Il est donc possible de conserver ce classement initial. Il en est de même pour l'échantillon S1-130 initialement classé comme *Sival* et qui se retrouve classé au milieu des échantillons de *Sival* de l'AFC malgré un classement en *Tintal* par la CAH.

V. Étude des variations écologiques par les assemblages malacologiques

1. Série sédimentaire M2S10

Les échantillons malacologiques sont prélevés sur les S10-US6 à S10-US3 et sur le S10-US1 de surface (Fig 5.8) du sondage. L' S10-US6 correspond à une première phase S10-M4 qui présente des concentrations importantes de coquilles d'environ 300 à 600 individus par litre. Sur ces niveaux, l'espèce *C. infundibulum* est dominante avec des taux de 59% à 61%. Les taux de *Pyrgophorus* sp. épineux et lisses de ces niveaux sont, en moyenne, respectivement inférieurs à 20% et 14%. Quant aux Planorbis, ils ne dépassent pas 6% des assemblages. Dans ces comptages, l'espèce *P. flagellata* n'est représentée que par des fragments et les autres espèces ne représentent pas plus de 2% des coquilles de l'assemblage. Enfin, les Characeae montrent des valeurs de 4% de l'assemblage. Des assemblages fossiles, majoritaires en *C. infundibulum*, ont été interprétés pour la *Laguna coco* au Belize comme une phase

d'érosion des sols liée à un assèchement des eaux ou à une phase de réduction des processus d'inondation (Bradbury et al., 1990). Les assemblages de phytolithes associés sont assez pauvres en diatomées, tout en présentant des valeurs de spicules d'éponges avoisinant les 30% correspondant, aujourd'hui, à des environnements humides non-pérennes. Le signal apporté par ces assemblages de mollusques aquatiques confirme la présence d'une zone humide non-pérenne.

L'S10-US5 est étudié par 5 échantillons qui forment la phase S10-M3 (Fig 5.8). Sur ces niveaux, la concentration en coquilles varie entre 350 et 3000 coquilles par litre sans suivre un patron évolutif. En moyenne, les pourcentages de *C. infundibulum* ne dépassent pas 6%, excepté un pic à 24% sur l'échantillon sommital (S10-124/136). Les taux de *Pyrgophorus* sp. épineux restent stables entre 28 et 40%. En revanche, pour les coquilles de *Pyrgophorus* sp. lisses, il est possible de suivre trois étapes de variations des valeurs. La première phase S10-M3c, composée des 2 échantillons basaux, présente des taux de *Pyrgophorus* sp. lisses supérieurs à 35% puis la seconde phase S10-M3b, composée des deux échantillons médians, a des taux diminués à 15% enfin, la troisième phase S10-M3a composée de l'échantillon sommital (S10-124/136) présente un taux à 30%. Ces trois mêmes phases sont également identifiables pour les Planorbes. La phase S10-M3c a des taux de Planorbes compris entre 16% et 24% tandis que la phase S10-M3b présente un doublement de ces valeurs avec des taux entre 38% et 43%, avant de diminuer à 18% pour la phase S10-M3a. Les fragments de *P. flagellata* sont toujours rares et ne sont présents que pour les phases S10-M3c et S10-M3a. Les Characeae suivent le même patron et ne sont présentes (entre 1% et 3%) que sur les phases S10-M3c et S10-M3a.

Le travail malacologique dans la *Laguna de cocos* au Belize, par Bradbury et al. (1990), a été mené sur une lagune beaucoup plus étendue (600x300m) et profonde (1m50) que les *Sival* de Naachtun. L'assemblage de sub-surface y présente un nombre de coquilles de *Pyrgophorus* sp. lisses supérieur au nombre de *Pyrgophorus* sp. épineux mais avec un nombre de coquilles de Planorbes comparable à ces derniers. Dans les centimètres plus profonds de ce même sondage, les proportions de formes épineuses et lisses de *Pyrgophorus* sont inverses et le taux de Planorbes y est encore plus important. Ce type d'assemblages est interprété comme une zone humide de type lagune. Ce type d'assemblage est également observé dans le lac Petén avec des valeurs moyennes de Planorbes comparables aux taux de *Pyrgophorus* sp. (Covich, 1976). Ces assemblages, plus riches voire majoritaires en Planorbes avec des taux moyens en *Pyrgophorus* sp., se retrouvent sur cette phase S10-M3 et de manière plus prononcée sur la phase S10-M3b (Fig 5.8). L'absence de *P. flagellata* sur cette même phase S10-M3b pourrait être interprétée comme un éloignement du rivage (Basch, 1959), de même pour l'absence de Characeae (Soulié-Märsche, 2002). La prédominance de formes épineuses de *Pyrgophorus* sp. sur les formes lisses pourrait être interprétée, ici, comme la présence d'une masse d'eau plus translucide (Covich, 1976) correspondant bien à une phase lagunaire du plan d'eau.

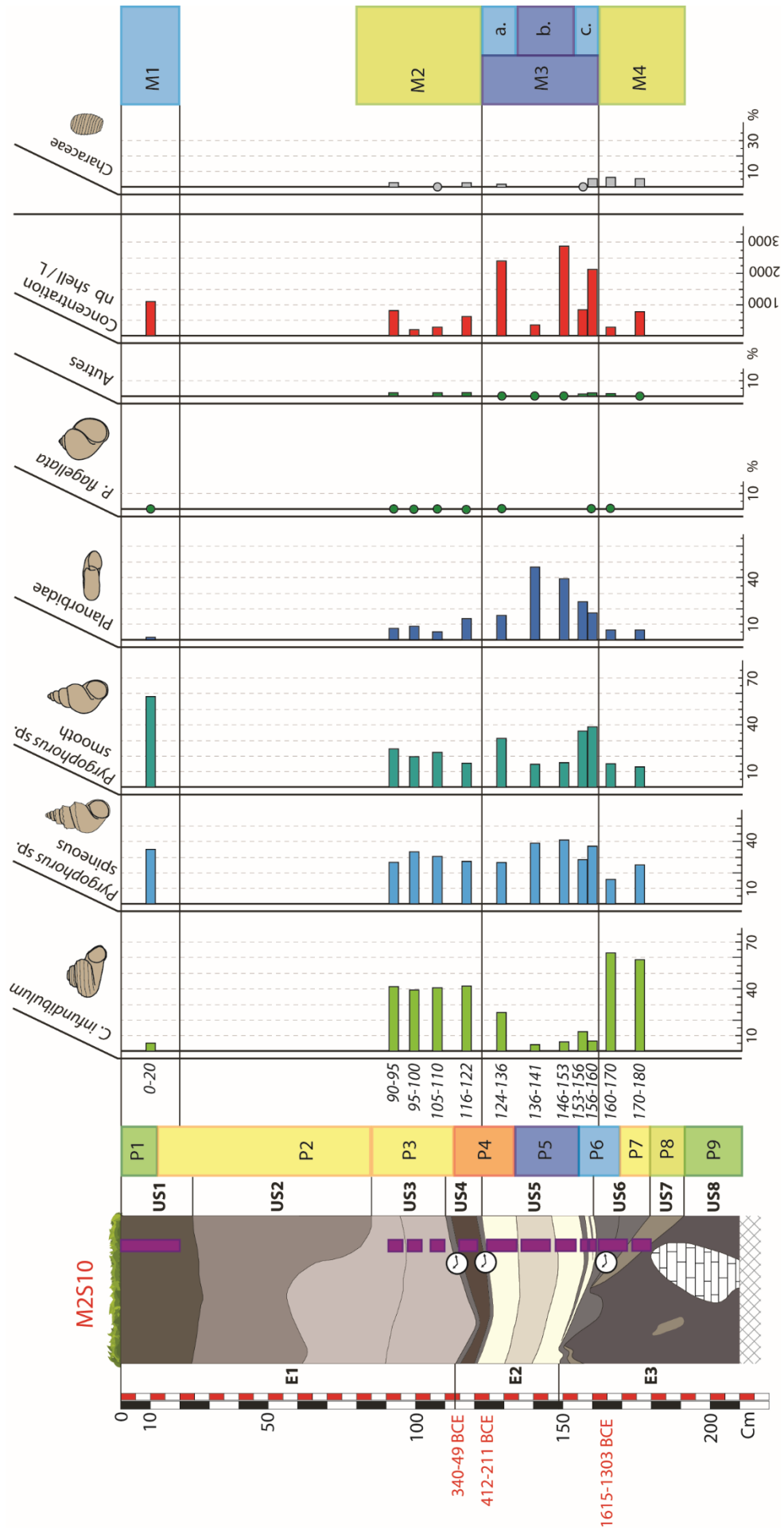


Figure 5.8 – Diagramme de distribution des principales espèces de gastéropodes dans les échantillons de la série sédimentaire M2S10, accompagné des concentrations en coquilles et en Characeae des échantillons.

Ainsi, la phase S10-M3 correspond à une phase de plan d'eau, entre au moins 1300 et 400 BCE, dont l'apparition coïncide avec l'augmentation des Planorbes (phase S10-M3c), suivie d'un maximum du plan d'eau correspondant à la phase S10-M3b et une diminution du plan d'eau qui débute à la phase S10-M3a. Cette hypothèse est soutenue par les fortes concentrations de coquilles par litre de sédiment et par la sédimentation calcaire de l'US5 mais également par les assemblages de phytolithes. Les phytolithes, correspondant à la phase S10-M3c (S10-P6), montrent l'arrivée d'un écosystème plus humide, proche d'un *Sival*, avec la prédominance de phytolithes associés aux Poaceae et au Cyperaceae et surtout avec l'augmentation des diatomées. Les échantillons, correspondant à la phase S10-M3b (S10-P5), sont dominés par les diatomées et permettent de proposer la présence d'un plan d'eau plus important que les *Sival*. Enfin, les phytolithes, correspondant à la phase S10-M3a (S10-P4), permettent de proposer une réduction du plan d'eau en lien avec la diminution des valeurs de diatomées et de spicules d'éponges.

Le S10-US4 et le S10-US3 correspondent à la phase malacologique S10-M2 dont les assemblages poursuivent la dynamique observée à la phase S10-M3a (Fig 5.8). Les 4 échantillons présentent des valeurs de concentration comprises entre 200 et 700 coquilles par litre. Lors de cette phase, les valeurs de *C. infundibulum* varient entre 40 et 42%. Les taux de *Pyrgophorus* sp. épineux restent plutôt constants, entre 26 et 32% tandis que les morphotypes lisses passent à des valeurs plus basses comprises entre 17% et 24%. Les Planorbes sont de moins en moins représentées au cours de cette phase et passent de 12% à 7%. Si les Characeae sont toujours présents dans les assemblages, leur taux ne dépasse pas 2%. Tout comme la phase S10-M4, la domination des assemblages par les coquilles de *C. infundibulum* indiquerait une phase de réduction des processus d'inondation, ce qui irait dans la continuité d'une diminution du plan d'eau observée lors de la phase S10-M3a. Toutefois, ce signal est en contradiction avec les hauts niveaux de diatomées de la phase de phytolithes correspondante S10-P3 qui indiquent plutôt un plan d'eau pérenne.

Enfin, l'échantillon de surface du S10-US1 correspond à une dernière phase S10-M1 (Fig 5.8). Les taux de *C. infundibulum* y sont de 5% alors que les coquilles de *Pyrgophorus* sp. épineux et lisses présentent des valeurs respectives de 34% et 58%. Les Planorbes présentent des taux résiduels de 2% et les *P. flagellata* ne sont présents que sous la forme de fragments. Enfin, aucune Characeae n'a été relevée pour ce niveau. Cette phase correspond à un environnement moderne de forêt de *bajo* à proximité d'un *Sival*, c'est-à-dire à un milieu temporairement inondé durant la saison des pluies et émergé l'autre partie de l'année. Cette domination des formes lisses sur les formes épineuses est interprétée comme une réponse à des conditions défavorables à la prédation telles une forte turbidité des eaux (Covich, 1976 ; Bradbury et al., 1990). Ce paramètre coïnciderait bien avec les étendues d'eau peu profondes et riches en matière argileuse des zones de *Sival* dans le *bajo* de Naachtun.

2. Série sédimentaire M1S2c

L'ensemble basal S2-E2, qui a été étudié sur la base de carottages, n'a pas livré d'assemblages interprétables car aucun des échantillons ne présente plus de 10 coquilles identifiables. Il est possible que ce genre de prélèvements entraîne un biais dans ce type de faciès qu'un volume supérieur aurait évité. Ainsi, l'analyse malacologique du sondage M1S2c repose uniquement sur les prélèvements réalisés en colonne stratigraphique sur l'ensemble S2-E1 (Fig 5.9). Contrairement au sondage M2S10, le prélèvement des mollusques sur cette série sédimentaire a été réalisé 3 ans après le prélèvement des phytolithes.

De manière générale, les concentrations en coquilles sont plus faibles dans ce sondage que dans le sondage M2S10 avec des concentrations moyennes de 90 coquilles par litre (Fig 5.9).

La phase S2-M2 est définie depuis les assemblages malacologiques correspondant aux unités S2-US5 et S2-US4 (Fig 5.9). Les concentrations oscillent entre 4 et 35 coquilles par litre sans patron particulier. En revanche, au cours de cette phase, on remarque une évolution progressive des assemblages qui permet de proposer deux sous-phases : S2-M2b qui correspondrait à S2-US5 et S2-M2a qui correspondrait plutôt à S2-US4. Les taux de *C. infundibulum* passent graduellement de 44% à 9% au cours de cette phase S2-M2 mais avec une moyenne de 41% pour les trois échantillons de S2-M2b et une de 17% pour les six échantillons de S2-M2a. Dans le même temps, on voit les valeurs de *Pyrgophorus* sp. lisses augmenter graduellement de 20% à 49% (en moyenne de 27% sur S2-M2b à 39% de S2-M2a). Les coquilles de *Pyrgophorus* sp. épineux correspondent, en moyenne, à 33% des assemblages, avec des valeurs variant sur un intervalle entre 29% et 43%, à l'exception de l'échantillon S2-161/165 avec un taux à 20%. Quant aux Planorbes, ils représentent, en moyenne, 6% des assemblages et ne dépassent jamais 9%. Les *P. flagellata* n'apparaissent pas dans les assemblages, à l'exception de l'échantillon S2-156/161. Les autres espèces ne représentent jamais plus de 2% de ces assemblages. Concernant les Characeae, leurs concentrations varient sans patron particulier entre 26% et 68%, à l'exception des deux échantillons (S2-165/170 et S2-151/156) où aucune Characeae n'a été trouvée et qui présentent également la plus faible concentration de coquilles de l'US4. Dans ces échantillons, de nombreux restes osseux de micro-vertébrés ont également été observés.

La domination des assemblages par *C. infundibulum* en S2-M2b a déjà été interprétée comme une zone liée à des stocks d'eau fugaces (Bradbury et al., 1990). Sur ces niveaux, les assemblages malacologiques sont caractérisés par des concentrations assez faibles de coquilles (< 35 coquilles par litre) et sont associés à des concentrations en spicules d'éponges entre 10 et 20% et à l'extrême rareté des diatomées (S2-P2). Il est possible de considérer cet environnement comme la marge d'une zone humide exondée une majeure partie de l'année mais marquée par des épisodes saisonniers d'inondations. La présence de Characeae en grande quantité pourrait confirmer l'existence de communautés macrophytes associées à des zones peu profondes ou inondées saisonnièrement.

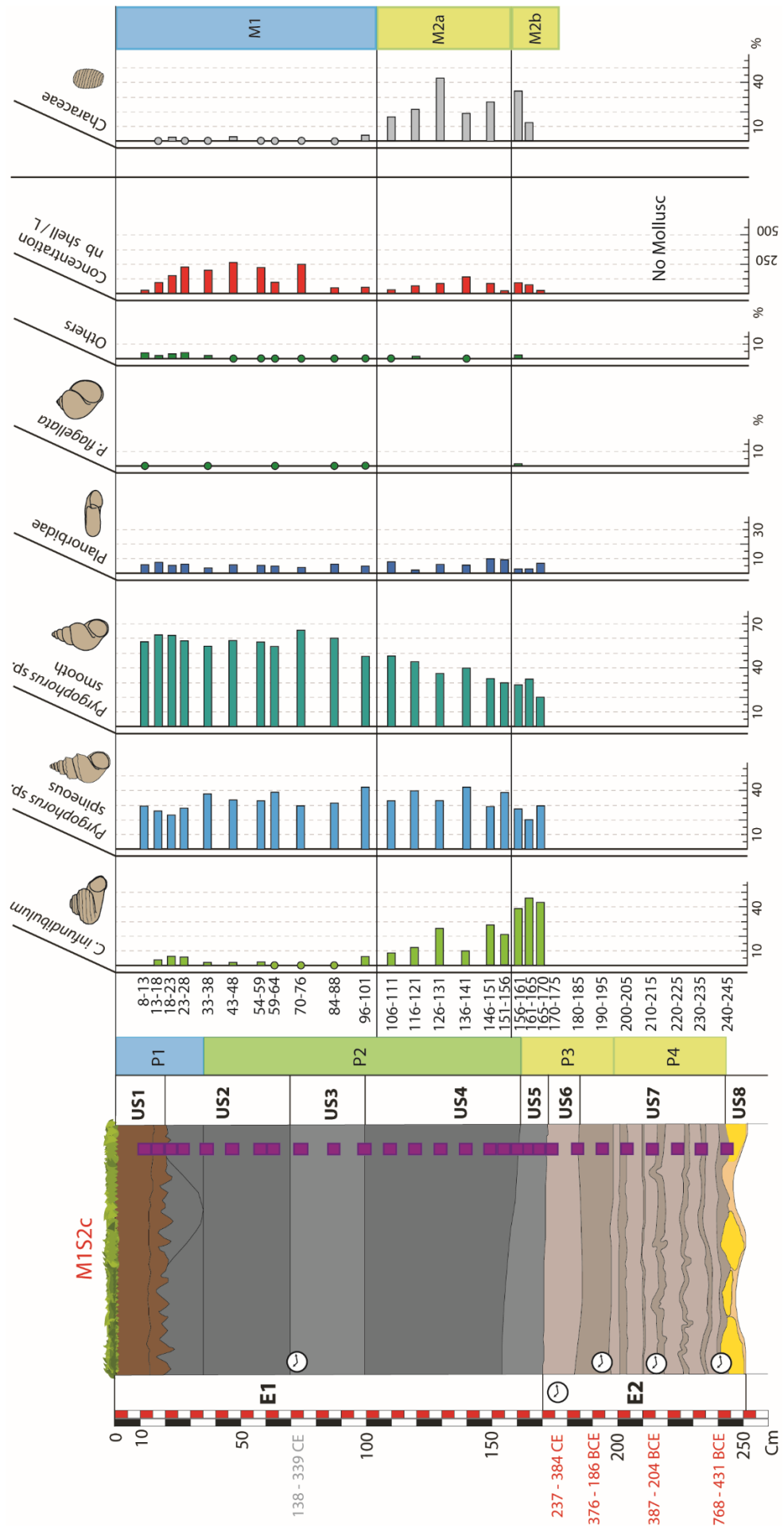


Figure 5.9 – Diagramme de distribution des principales espèces de gastéropodes dans les échantillons de la série sédimentaire M1S2c, accompagné des concentrations en coquilles et en Characeae des échantillons.

La diminution progressive en *C. infundibulum* et l'augmentation de *Pyrgophorus* sp. en S2-M2a pourraient faire penser à l'apparition progressive de conditions humides plus durables, information que l'on ne retrouve pas, toutefois, avec les bioindicateurs siliceux (Fig 5.6).

Les S2-US3 à S2-US1 correspondent à la phase S2-M1 (Fig 5.9). Les pourcentages de *C. infundibulum* ont diminué et représentent en moyenne 2,5% des assemblages, avec des valeurs maximales à 6%. Les concentrations de *Pyrgophorus* sp. épineux restent stables avec des valeurs moyennes de 32% comme sur la phase précédente. En revanche, les coquilles de *Pyrgophorus* sp. lisses ont des valeurs moyennes plus importantes de 58%, avec des pics à 65%. Les Planorbes restent très peu représentées avec, en moyenne, des concentrations de 5%. Les coquilles de *P. flagellata* sont représentées majoritairement par des fragments et les autres espèces restent toujours assez peu représentées et inférieures à 2% des assemblages, excepté pour l'échantillon de sub-surface qui atteint 4%. Ces autres espèces, majoritairement terrestres, sont très certainement originaires du versant. Enfin, ce qui est remarquable sur la phase S2-M1, c'est la raréfaction des Characeae qui prennent des valeurs similaires à celles des zones considérées comme *Sival* en M2-S10.

Comme déjà montré avec la phase S10-M1, la phase S2-M1 correspond à l'installation d'un environnement moderne de *Sival* (Fig 5.9). Les conditions plus humides sont caractérisées par des concentrations de coquilles 5 fois supérieures et des assemblages majoritaires en *Pyrgophorus* sp. lisses et moyennement riches en *Pyrgophorus* sp. épineux, déjà trouvés dans les zones de *Sival* de S10-M1. Il est possible de conclure à un environnement défavorable à la prédation telle qu'une forte turbidité des eaux (Covich, 1976 ; Bradbury et al., 1990), paramètre cohérent avec les eaux argileuses et peu profondes des *Sival* de Naachtun.

VI. Discussions

1. Caractéristiques d'une étude multiproxy en zone maya

i. Les interactions bénéfiques à l'étude multiproxy

Les assemblages de phytolithes ont été utilisés avec succès pour interpréter les communautés végétales passées à partir de l'étude des sédiments du *bajo* de Naachtun. Plus largement, les écosystèmes et leur hydrologie ont pu être approchés grâce aux bioindicateurs siliceux, spicules d'éponges et frustules de diatomées, sur la base des référentiels actuels produits à Naachtun (Testé et al., 2020). Les assemblages de mollusques dulçaquicoles ont par moment permis de renforcer nos interprétations (faites sur la base des bioindicateurs siliceux) du signal hydrologique des sondages M2S10 et M1S2c (Fig 5.8 et 5.9). Cela peut être démontré par plusieurs exemples concrets.

Le plus explicite concerne l'unité S10-US5. Les assemblages de mollusques, riches en Planorbes, y indiquent plutôt des zones lacustres (Bradbury et al., 1990). Ils ont permis de confirmer l'hypothèse d'un plan d'eau de grande envergure qui reposait uniquement sur les fortes proportions de diatomées. Sans les mollusques, il aurait été difficile de trancher avec

l'hypothèse d'une augmentation des conditions eutrophiques dans la zone humide ayant entraîné la formation des carbonates et un bloom de phytoplanctons (Rosenmeier et al., 2004).

Une autre correspondance se retrouve sur la perception des zones de *Chechemal* des unités S10-US1 et S2-US4, 3 et 2. L'échantillon actuel (S10-6) de la zone de *Chechemal* moderne, où se trouve M2S10, a livré les mêmes assemblages de phytolithes et de bioindicateurs siliceux que les échantillons fossiles de S2-US3, interprété donc comme une ancienne zone de forêt de *bajo*. L'assemblage malacologique (S10-M1) de l'unité S10-US1, qui correspond donc à un environnement de forêt de *bajo* saisonnièrement inondée, est très semblable à ceux trouvés sur les phases S2-M2a et S2-M1. Ces assemblages malacologiques sont également semblables à ceux trouvés sur l'unité S2-US1 qui correspond à un *Sival* moderne (S2-M1). Ici, c'est bien la comparaison de tous les bioindicateurs qui nous permet de donner une interprétation écosystémique : les trois unités fossiles considérées en début de paragraphe (S2-US4, 3, et 2) correspondent à une phase de *Chechemal* qui est périodiquement inondée.

Et en effet, de manière générale, il semble que le signal hydrologique, interprété depuis les assemblages de mollusques ou les concentrations de bioindicateurs siliceux, présente les mêmes tendances de variations. Ainsi, sur M2S10, ces bioindicateurs montrent tous une phase d'augmentation du plan d'eau avant une phase de diminution quand sur M1S2c, les bioindicateurs montrent une augmentation progressive des niveaux d'eau (Fig 5.10). Mais, si ces tendances sont semblables et que la corrélation entre gastéropodes et bioindicateurs siliceux fonctionnent sur certains niveaux, il est à noter qu'il y a de nombreux décalages et irrésolutions dont il faut discuter.

ii). Indépendance des réponses écologiques des bioindicateurs

Les décalages de réponses écologiques se retrouvent, notamment, sur la série sédimentaire M1S2c (Fig 5.9, 5.10). Sur l'ensemble S2-E1, les assemblages de mollusques correspondent à la mise en place d'un *Sival* qu'on remarque par la diminution des *C. infundibulum* en S2-US4 et la domination des *Pyrgophorus* sp. dès S2-US3. Les spicules d'éponges, en revanche, ne signalent la présence d'un *Sival* qu'à partir de S2-US2 (Fig 5.10). Ce décalage temporel dans les tendances peut provenir de différents paramètres : écart dans l'échantillonnage, la tolérance aux variations écologiques ou encore la taphonomie des assemblages.

Le prélèvement des échantillons malacologiques ayant été réalisé 3 ans après le prélèvement des échantillons de phytolithes, l'argiloturbation aurait pu décaler les profondeurs des différentes unités sédimentaires (Beach et al., 2009). Si les profondeurs d'échantillonnage ont été calibrées entre les sondages de 2013 et de 2016, atténuant le phénomène, il est à considérer dans les hypothèses expliquant le décalage de réponses des bioindicateurs. On peut également prendre en compte le pas d'échantillonnage qui est de 1cm pour les phytolithes et les bioindicateurs siliceux contre 5cm pour les mollusques et les volumes de prélè-

vement qui sont de 25cL pour les bioindicateurs siliceux contre de 5 à 10 L pour les mollusques. Ce pas et ce volume d'échantillonnage très différents, liés à une sédimentation perturbée mais relativement homogène d'une US à l'autre, rendent difficile un prélèvement de précision et peuvent également expliquer un décalage des signaux écologiques sur quelques centimètres.

Le référentiel moderne de Naachtun (Testé et al., 2020) indique que la dispersion des spicules d'éponges et frustules de diatomées fossiles répond à un différentiel écologique. Les éponges sont des organismes aux modes de vie fixés dont les spicules constituent le « squelette » interne (Harrison, 1988 ; Frost, 2001). Ainsi, le dépôt des spicules est lié à la décomposition de l'éponge et donc à sa mort. Sans connaissance des communautés de spongiaires de Naachtun, la répartition des spicules, à large échelle dans le *bajo* et jusqu'aux zones saisonnièrement inondées, peut résulter de deux types de communautés de spongiaires. Il s'agit soit d'éponges qui résistent à de longues périodes de dessiccations par un phénomène d'enkystement (Simpson et Fell, 1974) et ainsi, les dépôts de spicules sont donc autochtones, soit d'éponges aux cycles de vie uniquement aquatique dont les dépôts de spicules sont transportés à travers le *bajo* lors des phases d'inondation. Enfin, pour ces deux cas, il est possible d'imaginer que les spicules déposés par les communautés aquatiques soient remobilisés par flottation et déposés à l'échelle du *bajo*, comme cela a été montré avec le référentiel actuel.

Le référentiel moderne montre, au contraire des spicules, que la distribution des frustules de diatomées est limitée aux zones d'eau pérennes (Testé et al., 2020). Les diatomées sont des organismes phytoplanctoniques mobiles qui vont pouvoir suivre l'évolution des masses d'eaux (Smol et Stoermer, 2011). Il est alors normal de voir une concentration des frustules dans les dépôts des zones d'eau les plus pérennes. La taille microscopique des frustules pourrait faciliter le transport post-dépôts par flottation, toutefois, le référentiel moderne semble indiquer que dans les environnements de *bajo*, le transport des frustules fossiles est relativement réduit.

Concernant les mollusques, l'écologie des espèces de Naachtun est assez mal décrite et de nombreuses données sont manquantes. Les gastéropodes d'eau douce sont considérés comme des organismes mobiles sur un territoire assez restreint qui sont liés à des conditions hydrologiques et à un habitat végétal (Limondin-Lozouet, 2002). Toutefois, ces organismes et leurs pontes possèdent de nombreux moyens de dispersion et de colonisation (poisson, amphibien, oiseau, insecte, dévalaison) de nouveaux milieux et peuvent « hiberner » lorsque les conditions sont défavorables à leur survie (Dillon, 2000). Il semble alors assez facile d'imaginer une large dispersion des populations de mollusques dulçaquicoles à l'échelle d'un *bajo* comme le montrent les communautés modernes homogènes entre les zones de *Sival* et de *Chechemal*. Le dépôt de coquilles fossiles à large échelle dans le *bajo* par flottaison paraît peu probable en raison de la mauvaise résistance des coquilles au transport post-mortem (Limondin-Lozouet, 2002).

Ces cycles de vie et de réaction aux variations écologiques très différents entre les bioindicateurs sont à l'origine des réponses environnementales diachroniques. La perception d'un changement environnemental n'est pas exprimée dans la même spatialité ou temporalité en fonction des taxons étudiés. Ces variations de réponses aux changements environnementaux se captent d'autant plus facilement que les référentiels moderne, taxonomique et/ou écologique sont disponibles pour les différents bioindicateurs

iii). Incertitudes liées à l'absence de référentiel

a). Le cas du gastéropode *C. infundibulum* (Plt 5.1)

En plus des décalages temporels dans la perception de conditions écologiques, les assemblages malacologiques et les concentrations en bioindicateurs peuvent donner une interprétation écologique assez différente d'un même échantillon (Fig 5.10). Les phases S10-M4, S10-M2 et S2-M2b sont caractéristiques de cette incertitude puisqu'elles indiquent des zones relativement peu humides, proches d'une auréole externe de *bajo* (*planada*) alors que les spicules et les diatomées sont interprétés, eux, comme une zone de *bajo* saisonnièrement inondée (S10-P7, S2-P3), voire une zone en eau pérenne (S10-P6, S10-P4). Il y a de grandes chances, ici, que cela soit la mauvaise connaissance de l'écologie de *C. infundibulum* qui soit la cause de cette dissonance.

En effet, *C. infundibulum* n'est aujourd'hui plus trouvé dans le Petén que sous état sub-fossile (Goodrich et Van der Schalie, 1937 ; Covich, 1976). Aujourd'hui, l'espèce se retrouve dans des lacs au nord de la péninsule du Yucatán et son autécologie n'a pas été étudiée (Covich, 1976 ; Bradbury et al., 1990). Cette méconnaissance de l'espèce en question se ressent notamment chez Bradbury et al. (1990). L'auteur interprète les pourcentages importants de *C. infundibulum* comme indicateur d'eau douce puis comme indicateur d'un assèchement des plans d'eau avant de terminer par les considérer comme indiquant des hauts niveaux hydrologiques. Ici, la méconnaissance de l'écologie de l'espèce et l'absence d'un référentiel actuel peuvent facilement expliquer le décalage dans nos interprétations paléoécologiques.

Il serait donc, tout à fait possible, de réinterpréter la Fig 5.10 avec des hauts niveaux d'eau pérennes comparables à un *Sival*, indiqués par *C. infundibulum*, au moins sur la phase S10-P4. Mais, cette interprétation hydrologique basée sur les hauts niveaux de l'espèce *C. infundibulum* amènerait cette fois-ci que les phases S10-P7 et S2-P3, qui indiquent plutôt des zones peu inondées de *bajo*, soient sous-évaluées par rapport aux phases malacologiques correspondantes. On voit encore ici une irrésolution due à une méconnaissance des conditions hydrologiques de vie de l'espèce *C. infundibulum*.

Toutefois, il peut être possible de lier les variations de *C. infundibulum* aux dynamiques des formations végétales plutôt qu'aux variations écologiques. Covich (1976) interprète les pics de *C. infundibulum* au regard du lessivage et de l'érosion des versants du lac Petén Itza, dus à une déforestation et qui auraient augmenté la productivité. Bradbury et al. (1990) lient éga-

lement les fortes concentrations de *C. infundibulum* à des phases palynologiques d'ouvertures du milieu pendant l'occupation maya. Nos trois phases dominées par les *C. infundibulum* (S10-M4, M2 et S2-M2b) correspondent à des phases de végétations très ouvertes du *bajo* de Naachtun. D'ailleurs, les environnements yucatèques, où ils ont été trouvés actuellement, sont relativement moins denses que ceux du Petén. Toutefois, conclure à un lien entre l'ouverture de la végétation, anthropique ou climatique et cette espèce de gastéropode serait encore prématuré. Aux vues des incertitudes liées à l'écologie de *C. infundibulum*, cela nous laisse une autre piste d'interprétation de ces données, notamment dans le cadre des pratiques humaines signées par les phytolithes.

b). Interprétation écologique d'un assemblage inconnu de phytolithes

Les milieux ouverts étudiés sur le site de Naachtun se résument aux zones de *Sival* (Testé et al., 2020). Toutefois, dans les reconstitutions paléoenvironnementales de cette étude, on trouve de nombreux assemblages inconnus qui sont interprétés comme des végétations ouvertes ou semi-ouvertes (S1-P5c, S10-P7, P4, P3, P2 et S2-P4, P3 - Fig 5.3,5.4 et 5.6).

En l'absence de référentiels modernes régionaux, calibrés botaniquement et qui présenteraient ces assemblages, il n'est pas possible d'en tirer une interprétation précise sur les communautés végétales. En revanche, les approches par indices et statistiques peuvent nous renseigner sur les formations végétales. Ainsi, l'indice D:P a permis de valider des formations végétales ouvertes (S1-P5c et S10-P7, P4, P3 et P2) quand l'index LU confirmait que les échantillons avec des indices D:P fluctuant autour de 1 correspondaient bien à des zones végétales mixtes (forêt avec sous-bois herbeux ou savane avec des arbres éparses/à proximité – S2-P4, P3). Enfin, l'approche statistique a permis de conforter ces hypothèses mais également d'avoir une lecture sur les formations végétales les plus probables (Fig 5.7). Dans un premier temps, il a été montré que l'environnement ouvert S1-P5c avait certainement les mêmes communautés végétales ouvertes que les échantillons ouverts du sondage M2S10 (P7, P4, P3 et P2). Ces échantillons sont statistiquement plus semblables aux zones de *Sival* et aux zones de cultures qui ont été identifiées comme des végétations ouvertes et humides. Les statistiques ont, à l'inverse, confirmé que les échantillons « ouverts » de M1S2c (P4, P3) étaient plus semblables aux zones de *Chechemal* qu'aux zones ouvertes, confirmant peut-être une zone mixte entre végétation herbacée et arborée.

2. Construction du discours sédiment-bioindicateur

i). Corrélation entre les phases de bioindicateurs et les unités sédimentaires

A la lecture des phases d'assemblage, on remarque qu'elles peuvent être en décalage ou en concordance avec les unités sédimentaires. Ainsi, les phases malacologiques de M2S10 et M1S2c (Fig 5.8 ; 5.9), dans la limite du pas d'échantillonnage, correspondent à l'extension des différentes unités sédimentaires. On peut expliquer cette adéquation en raison du fait

que les mollusques sont très sensibles aux variations écologiques de leur milieu de vie, donc de la sédimentation.

En revanche, sur les trois séries sédimentaires M2S2, M2S10 et M1S2c, les phases d'assemblages de phytolithes sont souvent décalées des unités sédimentaires. En d'autres termes, certaines phases de phytolithes sont à cheval sur plusieurs unités sédimentaires qui ont pourtant des caractéristiques différentes (ex : S1-P6, S1-P4, S10-P6, S10-P4, S2-P3, S2-P2). Dans le cas de phase étendue comme S2-P3 ou S2-P2, il semble que les variations sédimentologiques n'influent pas sur la production de phytolithes et donc sur la végétation. Dans le cas de phases plus réduites, à cheval sur deux zones sédimentaires très différentes comme S10-P4 (Fig 5.4), il pourrait être nécessaire de se questionner sur la migration verticale des phytolithes (Fishkis et al., 2010). Toutefois, en l'absence d'indice allant dans le sens de cette hypothèse – comme l'enrichissement des niveaux les plus basaux des phases dans les morphotypes les plus petits –, il semble ici que les communautés végétales aient répondu à des variations écologiques de manières diachrones à leur enregistrement par les sédiments.

ii). Perception spatiale des variations environnementales

Un point important semble nécessaire d'être discuté concernant la représentativité géographique des trois séries sédimentaires qui ont été étudiées avec les bioindicateurs. Elles sont le résultat d'une sélection au sein de la campagne de 44 sondages sédimentaires dans la dépression topographique fermée que constituent le *bajo* et ses marges. Trois types d'environnements biophysiques et sédimentaires ont été privilégiés : 2 zones humides dans le cœur et en marge du *bajo* et 1 zone exondée saisonnièrement au centre du *bajo*. Ces environnements, bien que diversifiés, ne sont toutefois pas représentatifs de l'intégralité des environnements du *bajo El Infierno*. Par ailleurs, les environnements du *bajo El Infierno* sont eux-mêmes très différents de ceux du *bajo*, moins profond, au sud de Naachtun (Testé et al., 2020) ou encore des zones de *bajo* de la région de Naachtun (Castanet et al., 2017).

Ces trois séries sédimentaires, comme tout travail paléoenvironnemental, apportent donc un archivage fossile dont les représentativités temporelle et spatiale sont fragmentaires et incomplètes. Ces biais peuvent être amplifiés en fonction des bioindicateurs utilisés dans l'étude paléoenvironnementale. Tout particulièrement dans notre étude, les phytolithes, les mollusques et les bioindicateurs fournissent un signal écologique considéré comme très local. Si cela a permis l'identification d'une agriculture sur une zone précise, en revanche, il n'est pas possible de généraliser la tendance particulière d'une série à une échelle microrégionale, c'est-à-dire ici à tout le *bajo*. L'une des manières d'hypothétiser une tendance générale au *bajo* de Naachtun peut être de corrélérer, pour une même période de temps, les indices écologiques.

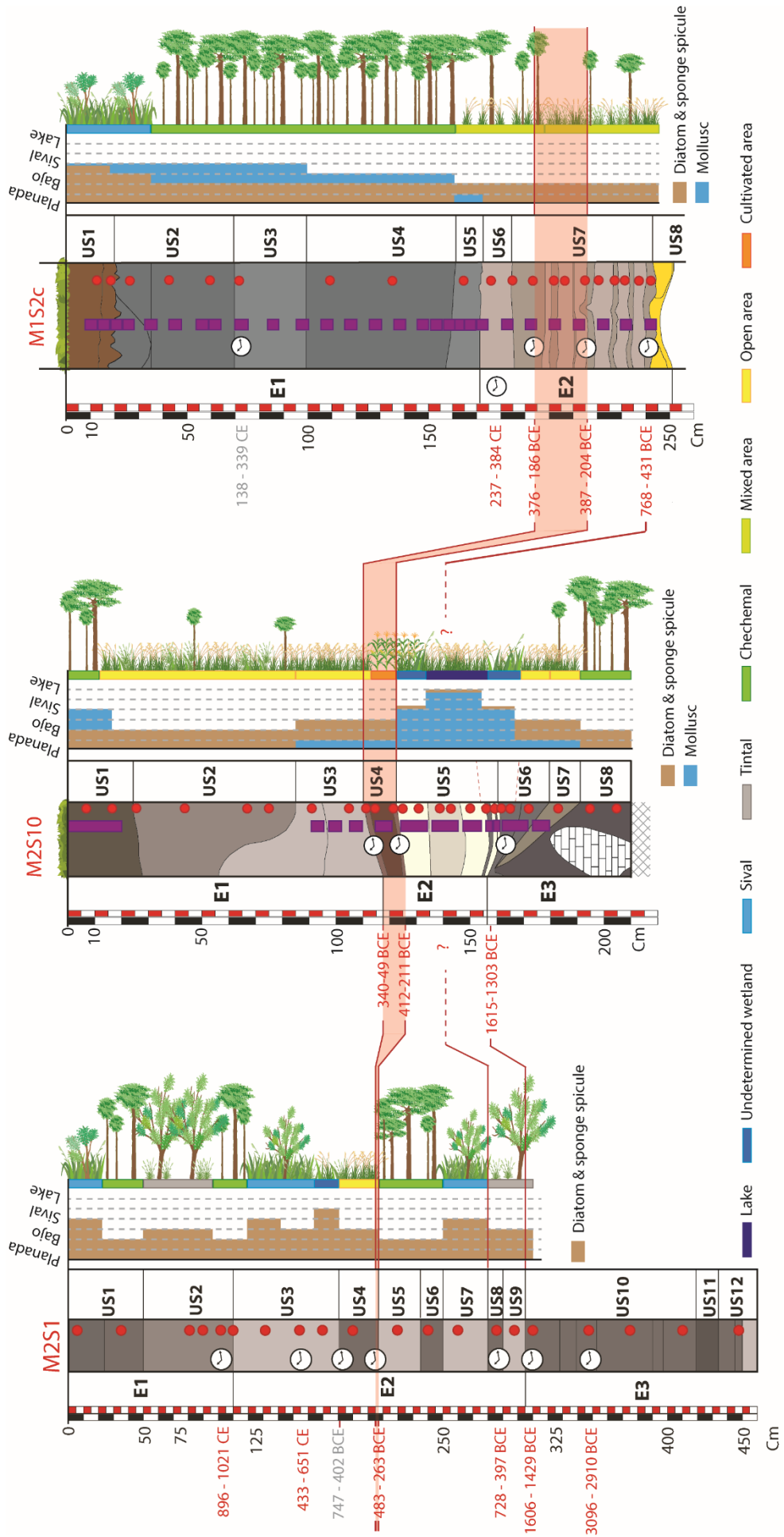


Figure 5.10 – Bilan des variations écosystémiques (communautés végétales, hydrologie) calibré à partir des phytolithes, hydrologie) calibré à partir des phytolithes, des bioindicateurs siliceux et des mollusques pour les trois séries sédimentaires étudiées.

iii). Exemple d'une opposition dans le discours : le lac Préclassique

Afin d'illustrer les deux derniers points abordés, il peut être utile de parler de la perception écologique de l'ensemble M2-E2 (Fig 5.2) qui illustrera un autre biais : l'interprétation différente entre le signal sédimentaire et paléoécologique.

Le sommet des correspondances des altitudes absolues supérieures de l'ensemble M2-E2 sont constantes de chaque côté du transect (Fig 5.2). Castanet et al. (2017) proposent, sur cette base et sur des taux de carbonate (Castanet et al., 2017), la présence d'un lac alcalin peu profond et beaucoup plus étendu que les *Sival* actuels, à un moment du Préclassique (les bornes de M2-E2 sont 1600 – 200 BCE). La modélisation de son extension est notamment facilitée par l'obtention d'un modèle de terrain LiDAR. Le centre ouest de ce large plan d'eau reconstitué, qui occupe la quasi-totalité de la portion du *bajo* étudié, se situe au niveau du sondage M2-S1 tandis que sa marge sud, elle, se situe au niveau du sondage M2-S10.

La corrélation des données biologiques entre les séries sédimentaires M2S10 et M2S1 propose une reconstitution différente. Les données de M2-US5 montrent, en effet, de forts taux de diatomées et des assemblages de mollusques qui sont caractéristiques d'une grande zone d'eau pérenne qui aurait existé à un moment entre 1615 et 211 BCE (Fig 5.4). En revanche, pour le sondage M2S1, les 4 unités sédimentaires (S1-US9, 8, 7 et 6) qui forment la période 1606-263 BCE, proposent des assemblages de bioindicateurs différents (Fig 5.3). Les S1-US8 et S1-US9 possèdent un assemblage de phytolithes caractéristiques d'une forêt de *bajo* après 728-397 BCE, l'unité S1-US7 présente un assemblage de *Sival* alors que les unités S1-US6 et S1-US5 montrent plutôt des assemblages de forêts de *bajo* de type *Tintal* (Fig 5.4). A l'exception de la phase de *Sival* (S1-US7), la plupart des environnements présents sont exondés une partie de l'année. Il apparaît alors que sur la base des bioindicateurs, il existait bien un large plan d'eau à l'ouest du *bajo* au niveau du transect M2. Toutefois, au regard des environnements actuels de Naachtun et de la région, il est difficile d'imaginer le centre d'un grand plan d'eau recouvert par une forêt pendant que ses marges présentent une végétation ouverte et herbacée comme cela a été proposé par l'étude des sédiments (Fig 5.10). Des résultats des bioindicateurs, le grand plan d'eau préclassique aurait plutôt été centré sur M2S10 tandis que M2S1 correspondrait à sa marge forestière. On voit ici l'importance de l'utilisation croisée des bioindicateurs mais également, le recoupement des différentes séries étudiées pour tirer une information paléoécologique à l'échelle du site.

3. Signature des pratiques agricoles par les phytolithes

Un des objectifs de cette étude est de tester le potentiel des phytolithes à caractériser des traces d'agriculture passées dans les environnements de *bajo*. Le travail mené avec les phytolithes sur les assemblages fossiles permet d'y apporter des réponses.

i). Étude des morphotypes de *Cross* : la culture du maïs au Préclassique récent

La richesse en morphotype *Cross* dans le sondage M2S10 et leur étude morphométrique permettent de révéler la présence du maïs comme cultigène dans un paléosol de *bajo*.

La domination des formes ML sur les trois premières phases (P1, P2, P3) correspond aux observations faites par Pearsall et Piperno (1990) et Iriarte (2003) dans le cadre d'écosystèmes herbacés qui ne présentent pas de maïs. L'augmentation et la domination des formes L sur la phase S10-P4 iraient dans le sens d'une phase de culture dans cette zone puisque cela a été observé dans les plantes de maïs (Iriarte, 2003). Mais, c'est surtout la présence de morphotypes XL qui permet d'y attester la présence de maïs cultivés. En effet, la présence de ce type de morphotype est une condition suffisante mais non nécessaire pour attester la présence de maïs dans un échantillon de sol (Pearsall et Piperno, 1990 ; Iriarte, 2003). Les échantillons des S10-US3 et S10-US2 présentent de nombreux morphotypes ML et ne présentent aucune trace de morphotypes XL indicateurs de maïs. Cette réduction des tailles et des pourcentages de *Cross* irait dans le sens d'une non-utilisation à des fins vivrières de cette zone après la phase agricole S10-P4 (Fig.6).

L'unité pédo-sédimentaire S10-US4 présente les caractéristiques d'un paléosol cultivé. Il arbore des traces de pédogenèse (bioturbation, teneur relativement accrue en carbone organique) et contient des bioindicateurs phytolithiques de cultigène tels que le maïs. Ce paléosol présente des traces d'oxydoréduction, ce qui valide l'interprétation paléoécologique faite ci-dessus. En effet, cette US comprend d'une part, des assemblages malacologiques témoignant d'une zone saisonnièrement exondée et d'autre part, des spicules, des diatomées et des Characeae indiquant des phases d'inondation ou la proximité d'un milieu aquatique.

Ces reconstitutions paléoécologiques démontrent la mise en place de pratiques agricoles dans le *bajo El Infierno*. Elles renseignent partiellement sur des systèmes de cultures établis en contexte extensif ou intensif, basés à minima sur le maïs, implantés à proximité de zones humides et ce, dès le Préclassique récent. Les premières structures archéologiques de bâti sur le site sont par ailleurs datées de cette période (Hiquet, 2019).

Ces résultats renseignent, possiblement, sur les pratiques agricoles intensives réalisées au sein-même du *bajo El Infierno* et des autres *bajo* du secteur de Naachtun telles qu'elles ont récemment été proposées sur la base des études LiDAR menées dans la région. De nombreuses structures hydrauliques et agraires nommées *wet land features* y ont effectivement été décrites et sont étudiées (Canuto et al., 2018 ; Castanet, 2019 ; Castanet et al., *in press*).

ii). Les *Globular faceted* : des traces d'agricultures pour la période Archaique ?

La phase S10-P9 présente des valeurs de *Globular faceted* de 4% (Fig 5). Ces phytolithes sont produits en petite quantité par les Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000). Ces niveaux sont

datés d'avant 1600 ans BCE. Les courges sont déjà cultivées en Mésoamérique à cette période (Colunga-García Marín et Zizumbo-Villarreal, 2004). Il serait donc possible de considérer ces traces comme les témoins d'une agriculture très précoce, établie dans le secteur de Naachtun, durant la période Archaïque.

Toutefois, l'observation des assemblages montre que pour chaque zone forestière des sondages de la section ouest, les *Globular mixed* sont toujours en association avec les *Globular faceted* résiduels. En effet, dans les zones de forêts de *bajo* à proximité des zones de *Sival*, on trouve de nombreuses plantes de *Cucurbita radicans*, une liane appartenant aux Cucurbitaceae et qui produit de petites Calebasses. Ces morphotypes de Cucurbitaceae ont également été trouvés dans les environnements modernes de *bajo* à Naachtun (Testé et al., in press). Dans notre cas, il est plus probable que ces phytolithes soient issus des populations sauvages et locales de Cucurbitaceae que d'un phénomène précoce d'agriculture à Naachtun. Cette interprétation laisse à penser également que la découverte de phytolithes de courges n'est pas une condition systématique à sa culture.

4. Contribution des bioindicateurs à une histoire environnementale de Naachtun

L'essentiel des reconstitutions paléoécologiques établies ci-dessus concerne les périodes du Préclassique ancien aux prémices de la période classique. Les connaissances archéologiques actuelles de Naachtun reposent sur des travaux qui ont permis de renseigner la période comprise entre la fin du Préclassique récent et le Post-Classique (Nondédéo, 2013 ; Sion, 2016 ; Hiquet 2019). A défaut de pouvoir reconstituer pleinement et avec une bonne résolution les interactions entre la population de la cité maya de la période Classique et de son environnement au cours de l'apogée de Naachtun, nous obtenons des résultats et discutons d'interactions socio-environnementales relatives à l'occupation de la zone durant le Préclassique, préalablement à l'émergence de la cité.

Malgré la présence précoce de phytolithes de Cucurbitaceae dans les assemblages basaux de M2S10, l'hypothèse d'une agriculture archaïque au Préclassique ancien à Naachtun n'a pour le moment été retenue dans ce travail. En revanche, sur cette même série, on note l'ouverture précoce, au moins au Préclassique ancien, potentiellement plus ancienne, de cette zone du *bajo* avec l'apparition de communautés végétales herbacées. L'absence de données (M2S1) ou d'archives sédimentaires (M1S2c) pour cette période empêche de discuter d'une ouverture généralisée de la zone du *bajo*. L'ouverture de la végétation, au cours de la période Archaïque ou au Préclassique ancien, a été révélée par les bioindicateurs de nombreuses zones humides des basses-terres centrales (Islebe et al., 1996 ; Curtis et al., 1998 ; Wahl et al., 2006 ; 2007 ; 2013 ; Carozza et al., 2007 ; Luzzader-Beach et al., 2017). Si le climat plus sec du début de la période préclassique (Douglas et al., 2016 ; Rosenmeier et al., 2016) a été questionné quant à l'extension de zones herbacées, leur développement diachrone et la présence de cultigènes (Wahl et al., 2006 ; Wahl et al., 2013) amènent plutôt les

auteurs à soutenir la thèse d'impacts anthropiques en différentes zones de la région des basses-terres centrales.

Sur les niveaux du Préclassique ancien à récent de M2S10, les données sur les bioindicateurs hydrologiques indiquent la présence d'une zone humide de grande taille (Fig 5.5 ; 5.10). Ce plan d'eau centré autour de M2S10, avec une marge atteignant M2S1, est interprété comme un lac qui pourrait prendre place au cours du Préclassique moyen si l'on en croit la datation de la phase la plus humide de M2S1. Ces résultats sont, dans l'ensemble, en accord avec les travaux paléohydrologiques et géoarchéologiques basés sur l'étude des marqueurs sédimentaires réalisés sur ces mêmes enregistrements (Castanet et al., 2017). Si la date « Préclassique moyen » est confirmée pour ce lac, son apparition coïnciderait avec la période d'augmentation des précipitations ou de diminution de l'évaporation (Préclassique moyen-récent) observée à plusieurs endroits des basses-terres centrales, par le $\delta^{18}O$ des lacs Salpetén et Puerto Arturo (Douglas et al., 2015 ; 2016 ; Rosenmeier et al., 2016), les diatomées du lac Tuspan (Nooren et al., 2018), le $\delta^{18}O$ des spéléothèmes de Macalchasm (Webster et al., 2007) ou sur la base de reconstitutions palynologiques spatialisées de la région (Carrillo-Bastos et al., 2012). La présence d'un large plan d'eau, comme c'est le cas pour de nombreux sites mayas (Tikal, El Mirador, La Joyanca, Yaxha), aurait pu favoriser une installation préclassique maya précoce sur son territoire.

Toutefois, la première trace certaine de la présence de l'homme sur le territoire de Naachtun ne remonte qu'au Préclassique terminal sous la forme de terrassement d'habitat périssable (Hiquet, 2019). Ce témoignage archéologique concorde avec l'identification d'un sol cultivé en M2S1,0 attesté par les phytolithes de cultigènes et la micromorphologie, démontrant ainsi la culture de maïs en zone humide de *bajo* à cette période (412-49 BCE). Il permet également d'ajouter un élément supplémentaire en faveur d'une utilisation des *bajo* dans la production alimentaire des sociétés mayas (Turner et Harrison, 1981 ; Pohl, 1990 ; Dunning et al., 1998). Les dates corrélées autour de la période 400 – 200 ans BCE des trois séries sédimentaires sur cette période (M1S2C, M2S1 et M2S10) présentent des assemblages riches en herbacées de type Panicoïdeae (Fig 5.10). Cela suppose une forte ouverture du milieu dans le *bajo* ou du moins, une composante herbacée des écosystèmes suffisamment forte pour penser à une ouverture générale du *bajo*. Elle pourrait provenir d'une pratique intensive de l'agriculture en son sein comme le laisse supposer l'augmentation des phytolithes associés aux Panicoïdeae. La pratique de l'agriculture au sein de *bajo* à cette période a également été attestée par les travaux sur les bioindicateurs de zones humides, notamment le pollen de maïs (Wahl, 2006 ; 2013 ; Carozza et al., 2007 ; Krause, 2019 ; Pohl, 2019) mais aussi par la géomorphologie qui a mis à jour des sols cultivés (Beach et al., 2009 ; Dunning et al., 2019) ou des structures agraires comme des buttes ou des champs surélevés (Dunning et al., 2019 ; Beach et al., 2019). Par ailleurs, ces mêmes types de structures ont également été mis en évidence par les techniques LiDAR dans les *bajo* des basses-terres centrales, notamment à Naachtun (Canuto et al., 2018). Bradbury et al. (1990) proposent que ce soit une augmentation des niveaux hydrologiques au Préclassique qui ait poussé les Mayas à utiliser les *bajo* et les zones humides pour l'agriculture. Nous retrouvons, en effet, ce signal

hydrologique sur le paléosol de M2S10 avec de fortes concentrations en diatomées et en spicules d'éponges. Cette hypothèse coïncide également au cadre paléoclimatologique local qui indique une période humide au Préclassique moyen et récent (Webster et al., 2007 ; Carrillo-Bastos et al., 2012 ; Douglas et al., 2015 ; 2016 ; Rosenmeier et al., 2016 ; Nooren et al., 2018).

Les environnements sédimentaires de ces périodes préclassiques sont diversifiés et présentent une stratification remarquable voire un litage. Sur M2S10 et M1S2c, ces environnements sédimentaires correspondent aux ensembles S10-E2 et S2-E2 (Fig 5.10). Les ensembles S10-E1 et S2-E1 présentent eux des environnements sédimentaires puissants, principalement argileux et fortement perturbés (Castanet et al., 2017). Ces niveaux ne possèdent pas de dates internes valides mais peuvent être considérés comme représentatifs de dépôts classiques sur la base des dates 14C – qui scellent les unités sédimentaires terminales au Préclassique récent (M2S10) et Classique ancien (M1S2c) – et des taux d'accumulations sédimentaires (Castanet et al., 2017). Les 1m50 supérieurs de la série M2S1 correspondent à des niveaux du Classique. Ce qui ressort de ces niveaux, c'est que les communautés végétales semblent relativement différentes d'une série à l'autre pouvant nous indiquer une mosaïque de paysages dans le *bajo* et certainement, une diversité de gestion de la zone humide au cours de la période classique.

Le sondage M2S10 présente des environnements ouverts, riches en *Panicoideae* (Fig 5.4). Il n'y a pas de trace particulière d'anthropisation mais le maintien d'une formation ouverte dans une zone de *bajo* seulement inondée par saison, habituellement et comme aujourd'hui, recouverte de forêt lors d'une déprise, laisse à penser que cette zone est toujours sous emprise de l'homme. En M1S2c, les phytolithes et les mollusques indiquent une fermeture des écosystèmes au début de la période classique et la présence d'une communauté végétale forestière de *bajo* (Fig 5.6). La présence de ce type de forêt dans le *bajo* à cette époque concorde avec les résultats anthracologiques du territoire de Naachtun qui montrent l'utilisation de nombreux bois typiques de végétations secondaires ou de *bajo* au cours du Préclassique ancien et récent (Dussol, 2017). Il semble y avoir, dans la zone de M1S2c, une déprise agricole, ce qui pose tout de même la question sur la réorientation des productions vivrières dans un contexte démographique croissant de la période classique (Hiquet, 2019). Enfin, sur M2S1, les niveaux classiques sont marqués par une alternance de forêts de *bajo* et de zones de *Sival* au moins depuis 433-651 CE. La zone humide de *Sival* de Naachtun, telle qu'on la connaît aujourd'hui (centrée sur M2S1 – Fig 5.1), semble donc se mettre en place au cours du Classique, dans le même temps où la série M2S10 semble être de moins en moins soumise à l'action d'un plan d'eau (Fig 5.10). Cette mosaïque de paysages (savane, forêt, zone humide) nous permet de douter de l'action de changements climatiques au cours de la période classique pour expliquer de si fortes variations à une si petite échelle. En revanche, les données démographiques et climatologiques nous montrent que la transition entre les périodes préclassique et classique (100 – 300 CE) est marquée par plusieurs événements. La transition Classique/Préclassique s'inscrit, à Naachtun, par un processus démographique où une croissance non-naturelle de la population est observée et pourraient provenir de

l'abandon des grandes cités alentours. Ces populations auraient très bien pu arriver avec des pratiques autres ou non-utilisées à Naachtun. Enfin, un évènement d'assèchement du climat est noté sur cette même période de transition (Douglass et al., 2015, 2016 ; Rosenmeier et al., 2016). Celui-ci aurait pu pousser les populations mayas locales qui utilisaient le *bajo* pour leurs productions agricoles à diversifier leurs pratiques (Bradbury et al., 1990). Ce processus aurait alors pu aboutir à la mosaïque de paysages que montrent les phytolithes dans le *bajo* de Naachtun mais également tel que le montre le LiDAR, avec l'identification de terrasses agricoles sur les versants (Canuto et al., 2018) ou la géoarchéologie avec les paléosols de l'intraste (Castanet et al., 2016).

Conclusion :

Les reconstructions paléoécologiques sur la base de bioindicateurs sont difficiles à mener en zone maya et ont souvent été restreintes aux zones d'eau pérennes. Dans cette étude, nous montrons que les phytolithes peuvent être utilisés dans les sédiments d'une zone humide saisonnièrement asséchée dans le but de reconstruire des écosystèmes anciens. L'existence d'un référentiel des phytolithes d'écosystème moderne a été déterminante pour l'interprétation des données fossiles, tout comme leur traitement statistique, les approches par indice ou par étude morphométrique de phytolithes particuliers. L'utilisation complémentaire de bioindicateurs comme les coquilles fossiles de gastéropodes mais aussi les concentrations en spicules d'éponges et les diatomées ont permis de confirmer certaines hypothèses sur l'état hydrologique de la zone humide, non-résolues avec les seuls phytolithes. Ce qui ressort de cette approche multiproxy est que le croisement des signaux écologiques permet de contrebalancer l'ensemble des biais taxonomiques et des manques de connaissances écologiques propres à chacun des bioindicateurs. Il a, en effet, été possible d'interpréter les variations des assemblages de phytolithes, de bioindicateurs siliceux et de mollusques fossiles en termes de changement d'écosystèmes à travers le temps.

Les plus anciens enregistrements de phytolithes montrent une forêt de *bajo* qui s'ouvre peu à peu, au moins avant 1600 BCE, très certainement au cours de la période Archaïque. Après 1600 BCE, et très certainement au Préclassique moyen (700 BCE), s'installe un lac sur la partie ouest du *bajo*, en lien avec une période climatique plus humide de la région, soutenu par les informations sur les bioindicateurs siliceux et les mollusques. Au Préclassique récent (400 – 200 BCE), il y a les premières traces d'agricultures dans la zone humide sous la forme de phytolithes de maïs et d'indications paléopédologiques. A cette même période, c'est surtout la présence de formations herbacées qui est remarquée puisque attestée par les phytolithes ou les mollusques sur les trois séries sédimentaires. Cette ouverture du milieu coïncide avec les premières traces d'occupation du site.

Le passage vers la sédimentation argileuse constituée d'unités épaisses est estimé au Classique ancien et est contemporain d'une crise démographique régionale et d'un assèchement du climat. Le peu de dates disponibles ne permet pas de montrer de grandes tendances éco-

logiques dans le *bajo* mais plutôt une mosaïque de paysages. A l'ouest, sur M2S1, après une phase d'inondation post-ouverture, un système de *Sival-Tintal-Chechemal* semble alterner, montrant certainement la mise en place de la zone humide connue aujourd'hui. Sur M2S10, les formations argileuses indiquent des assemblages très ouverts et riches en Panicoïdeae avant une fermeture du milieu sur l'unité sédimentaire de sub-surface. Enfin, à l'est, M2S1 montre plutôt une fermeture du milieu dès la période classique. Cette diversité d'écosystèmes à la période classique pourrait résulter de nombreuses adaptations des habitants de Naachtun aux changements climatiques.

Si les objectifs de cette étude ont été pour la plupart validés – à savoir une reconstitution des paléoécosystèmes grâce aux assemblages de phytolithes et de bioindicateurs annexes –, il reste encore des biais à atténuer afin de rendre cette approche plus efficace. Le premier qui ressort est l'absence de référence moderne pour de nombreux assemblages fossiles de phytolithes et de bioindicateurs fossiles. A Naachtun, les formations à forte composante herbacée ou les grands plans d'eau sont absents et leurs assemblages n'ont pas été référencés. Il en est de même pour une bonne partie des pratiques agricoles qui n'ont pour le moment pas été référencées en dehors des pratiques de brûlis (Chapitre 4). Il y a aujourd'hui un effort de référencement à faire sur les écosystèmes et les agrosystèmes des basses-terres mayas. Enfin, le second biais principal concerne l'utilisation des mollusques dans les sédiments de zones humides. Si l'écologie des mollusques terrestres de la région est bien connue (Dourson et Caldwell, 2018), ce n'est pas le cas des mollusques dulçaquicoles. C'est notamment vrai pour l'écologie de l'espèce *Cochliopina infundibulum* qui est pourtant l'une des espèces dont les variations sont les plus marquées dans les sédiments de Naachtun. Cette méconnaissance des valences écologiques des espèces de gastéropodes et le manque d'information sur les biocénoses modernes limitent l'interprétation des données fossiles. Un travail d'écologie, sous la forme d'un référentiel écologique d'assemblages, sur les communautés malacologiques des écosystèmes du Petén, permettrait dans un premier temps de mieux renseigner les conditions de vie des gastéropodes d'eau douce trouvés et d'améliorer l'interprétation paléoécologique de ces données.

Remerciement :

Cette recherche est soutenue par le Projet Naachtun 2010-2018 (Dir. Ph. Nondédéo), le Projet HydroAgro (coord. E. Lemonnier et C. Castanet), le Projet PAYAMA (coord. A. Garnier et E. Lemonnier), le LabEx DynamiTe (ComUEheSam), le Ministère des Affaires Etrangères (France), la fondation Pacunam, la société Perenco (Guatemala), le CNRS (France) et l'Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne. Cette recherche bénéficie de l'appui institutionnel du Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines (Guatemala).

Cette publication a reçu le support financier de la Fondation des Treilles. La Fondation des Treilles a été créée par Anne Gruner Schlumberger et a notamment pour but d'ouvrir et de nourrir le dialogue entre la science et les arts afin de faire progresser la création contempo-

rairie et la recherche. Elle accueille également les chercheurs et écrivains sur le domaine des Treilles (Var) - www.les-treilles.com.

- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 6 -

Gestion de l'environnement urbain chez les Mayas : étude des assemblages de phytolithes de l'intrasite de Naachtun

L'objectif du travail discuté dans ce chapitre est d'évaluer la capacité des assemblages de phytolithes à identifier les zones exploitées par l'agriculture maya au sein de la cité et à mieux renseigner les pratiques menées sur le site. Ainsi, des sondages ont été sélectionnés au sein de secteurs identifiés comme des zones de terrasses, des espaces résidentiels laissés vides, des sols préhispaniques considérés comme couverture naturelle avant l'occupation du site ou encore des zones d'aguada et de canaux. Au total, ce sont 49 échantillons, répartis dans 12 sondages, qui ont été étudiés.

Après le traitement des échantillons en laboratoire, seul un quart (13) des prélèvements ont fourni des assemblages de phytolithes interprétables, dont 4 correspondent à des niveaux de sols modernes. La multiplication des protocoles et des opérateurs dans la préparation des échantillons a permis de montrer que la phase analytique en laboratoire n'était pas responsable des mauvaises conservations de ces phytolithes. De nombreuses hypothèses sur la taphonomie peuvent être invoquées comme la mauvaise conservation dans les sols calcaires, ou encore des biais dans les protocoles de prélèvement des échantillons dans ces contextes perturbés. Les phytolithes ne semblent pas être un bioindicateur approprié pour l'étude des environnements végétaux intrasites à Naachtun.

En effet, l'interprétation agroécologiques et paléoenvironnementales du site à partir des 9 assemblages restants est donc assez limitée. Ils contribuent cependant, à apporter des informations importantes concernant l'exploitation de l'environnement du site par les populations mayas qui se sont succédées au cours des 3 derniers millénaires.

Un assemblage enregistre des phytolithes de courges permettant de témoigner au moins, de leur présence dans l'espace d'une unité résidentielle et très certainement leur exploitation. La comparaison des assemblages de phytolithes intrasites entre-eux, pour l'époque d'occupation maya du site, permet de montrer que les signaux herbacés sont bien présents, attestant d'une perturbation des secteurs forestiers par les populations mayas. Enfin, l'étude des morphotypes de phytolithes non-diagnostiques a permis de proposer des éléments de réflexion quant à l'utilisation des herbacées afin d'amender les sols relativement pauvres.

- CHAPITRE 6 -

Gestion de l'environnement urbain chez les Mayas : étude des assemblages de phytolithes de l'intraville de Naachtun

Introduction :

Les travaux réalisés à partir des archives sédimentaires du *bajo* de Naachtun (Chapitre 5) ont apporté les premiers indices d'une exploitation agricole par les Mayas. A l'échelle des basses-terres, les zones humides sont considérées comme des espaces privilégiés pour une agriculture vivrière (Dunning et al., 2019), qualifiée d'extensive (ou *outfield*) en raison de son éloignement des centres d'habitation (Killion, 1992 ; Lemonnier, 2006). Cette dénomination implique qu'il existe une agriculture intensive (ou *infield*) plus proche des centres. Et en effet, l'occupation agricole par les Mayas de leur espace urbain fait aujourd'hui consensus (Killion, 1990 ; Fisher, 2014). Ce type d'agriculture peut s'exprimer dans le paysage moderne par l'héritage d'anciennes constructions comme les terrasses agricoles, plutôt communes dans la région des basses-terres (Chase et al., 2011 ; Canuto et al., 2018). Elles ont pour principe de contenir les sols sur les zones de pentes et ainsi, y faciliter l'installation de culture sur des sols profonds. Si la culture du maïs y est attestée par l'étude d'isotope du carbone (Webb et al., 2004), les pratiques agricoles sur ces zones sont mal comprises. C'est essentiellement l'importance de la main d'œuvre, supposée nécessaire à l'entretien de ces terrasses qui leur confère une catégorisation parmi les cultures intensives (Kunen, 2001). En réalité, la plupart des réseaux de terrasses sont éloignés des grands centres urbains ou des régions les plus peuplées (Lemonnier, 2006) et sont limités aux zones de versants de *bajo* ou de fonds de vallées (Dunning et al., 2019). Si les terrasses constituent un imaginaire célèbre de l'agriculture maya, d'autres pratiques fondamentales peuvent être illustrées.

Dans son article de 1933a, sur un village du Campeche, Lundell décrit la présence de jardins-vergers clôturés, propres à chaque foyer et où sont cultivées à la fois des plantes ornementales et surtout des plantes économiques (tomate, poivre, tabac, chayote) dont de nombreux arbres (bananier, papayer, cacaoyer ou encore sapotillier). Ces observations ont été réitérées à de nombreuses reprises sur l'ensemble de la péninsule et ont conduit à penser que ce système de jardin-verger avait des origines préhispaniques (Caballero, 1992). Lundell (1933a) rapporte également que le centre du village recueille de nombreux arbres économiques comme des anones, des citronniers ou encore des orangers. D'un point de vue archéologique, cette dernière observation se vérifie par la phytosociologie moderne où les plus fortes concentrations d'arbres économiques se situent au cœur des anciens sites archéologiques et non à leur périphérie (Puleston, 1973). En revanche, à l'exception du cas de conservation exceptionnelle de jardins-vergers par les cendres volcaniques à Cerén, les témoignages archéologiques de cette pratique sont plutôt rares et indirects. En 2007, Hutson et al. proposent, sur la base des concentrations de résidus céramiques et de l'analyse de phytolithes dans les sols, une validation du modèle de jardin-verger à l'époque maya pour le site de Chunchucmil au Yucatán. Les auteurs annoncent, toutefois sans les figurer, avoir découvert des phytolithes

d'arbres fruitiers mais aussi de cultigènes, comme le maïs, pour valider la présence de jardin-verger.

La présence à Naachtun de nombreux contextes géoarchéologiques, montrant des étagements de pentes avec des terrasses aménagées mais également de grands espaces vides proches d'habitat, laisse penser que l'agriculture était intensément pratiquée au sein même de la cité de Naachtun (Castanet et Purdue, 2014). L'identification au LiDAR de terrasses et de zones délimitées a confirmé ces observations (Canuto et al., 2018). Cette supposition est également soutenue par la découverte de charbons d'arbres fruitiers sur le site (Dussol, 2017). Dans le cadre de ces découvertes géoarchéologiques, nous avons décidé d'utiliser les phytolithes pour tester certaines hypothèses propres aux différents contextes (amendement, cultigènes utilisés, irrigation, etc.). Ainsi, 4 contextes différents ont été sélectionnés et sont représentés par l'étude de 12 sondages géoarchéologiques: 1) des zones supposées cultivées intégrant des structures de terrasses, 2) des zones contenant des sols supposées être des amendements avant exploitation, 3) des zones supposées être la couverture originelle avant l'occupation du site marquées par une structure massive du sédiment et enfin, 4) des zones aquatiques, comme une aguada ou un canal, dont le rôle pouvait être d'assurer l'irrigation des cultures de l'intrasite.

I. Diversité des sondages étudiés à Naachtun avec les phytolithes

1. Composition et extension de l'intrasite de Naachtun

i). L'épicentre politique

Le site, ou intrasite, de Naachtun est constitué de secteurs concentriques, définis à partir de la densité du bâti et de la présence de structures monumentales et repose sur la zone d'escarpement (Fig 6.1). En position centrale et accolé à la rive sud du *bajo* nord, se trouve l'épicentre du site, couvrant 33Ha. Il est composé de trois groupes C, A et B, alignés sur un axe ouest-est (Hiquet, 2019 - Fig 6.1).

Le groupe C se trouve sur un plateau et est constitué uniquement de constructions monumentales cérémonielles ou rituelles (notamment une acropole royale, complexe triadique) qui datent de la période Classique ancien (Hiquet, 2019). Le groupe C est relié au groupe A par une chaussée qui traverse le canal orienté nord-sud et qui sépare ainsi le site en deux parties est et ouest (Fig 6.1). Le groupe A se situe sur une colline de l'escarpement. On y trouve la pyramide la plus imposante du site mais également le seul terrain de jeu de balle identifié ou encore la plus grande place. Si les stèles sont datées du Classique récent, la plupart des structures datent, elles, du Classique ancien (Hiquet, 2019). A l'est et au sud-est du groupe A, se trouve le dernier groupe, le groupe B. Il est constitué de nombreuses structures longues, organisées en patios autour de 3 grands complexes, ouest, centre et sud (Fig 6.1). La plupart de ces structures ont une vocation résidentielle élitaire et datent exclusivement de la période Classique récent (Hiquet, 2019).

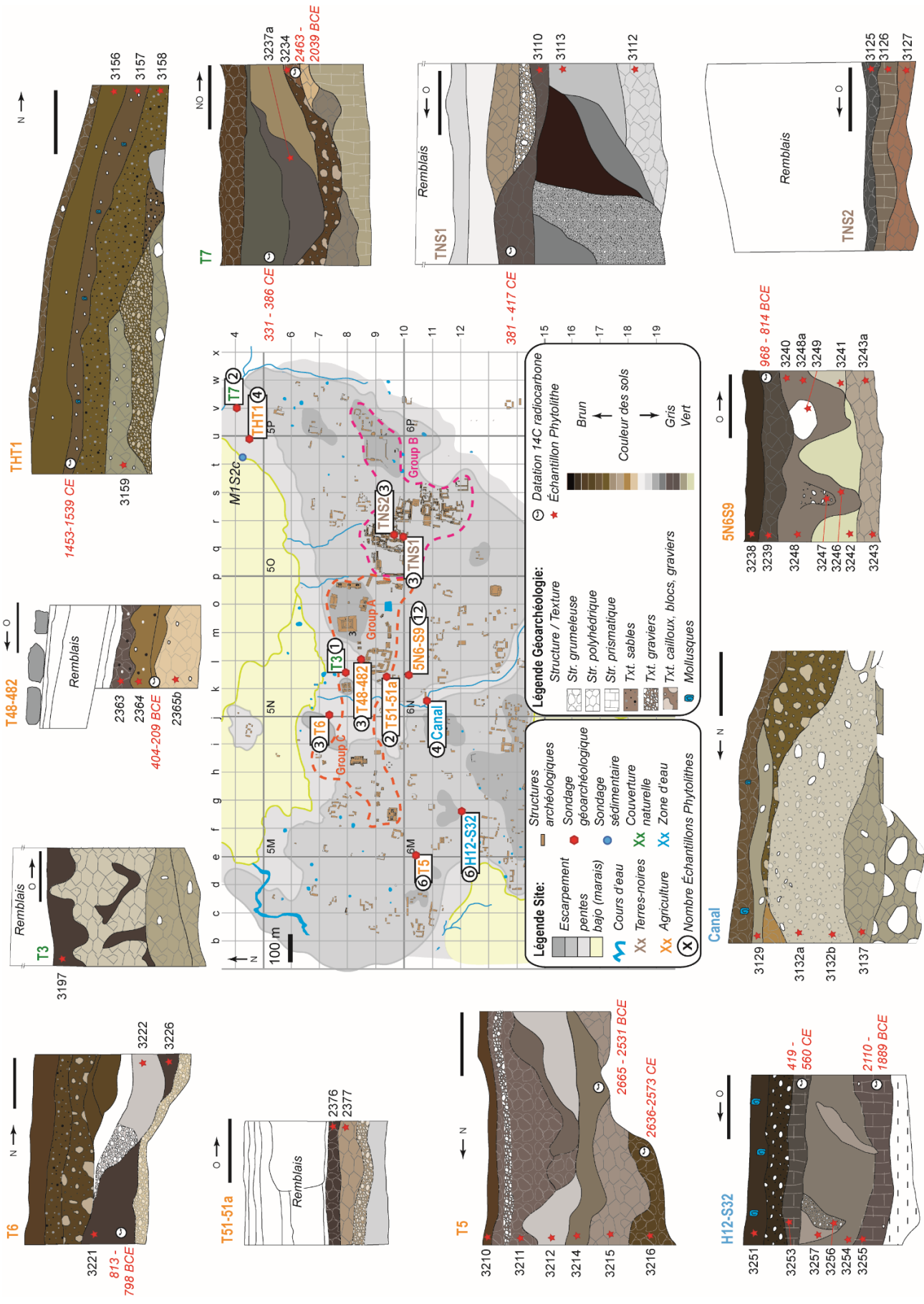


Figure 6.1 : Cartographie résumée de l'intraville de Naachtun (d'après Lemonnier et Cotom Nimatuj, 2017) montrant les groupes de l'épicentre politique et la zone résidentielle. La position des sondages géoarchéologiques étudiés ainsi que le nombre d'échantillons UE de phytolithes prélevés y sont indiqués. Chaque sondage est illustré par un schéma de la face de la fosse où on était réalisé les prélèvements de phytolithes (d'après Castanet et Purdue, 2014 ; Purdue 2014 ; 2018). Barre d'échelle : 50cm

ii). La zone résidentielle et l'arrière-pays

L'épicentre est entouré par une vaste zone de plus de 150 Ha qui est composée de plus de 600 structures de bâti, soit une densité de 4 structures par Ha. Les structures sont réunies autour d'espaces considérés communs et forment, regroupés, une unité résidentielle. Cet espace est considéré comme la zone résidentielle de Naachtun.

Au nord et au sud, elle est limitée par la présence des *bajo* tandis qu'à l'ouest et à l'est, ce sont les lits encaissés de cours d'eau saisonniers qui forment la frontière de ce secteur. La majeure partie de la population y habite au cours du Classique ancien, avant de voir une réorganisation de l'habitat au Classique récent, distribué entre la zone résidentielle et le groupe B de l'épicentre (Hiquet, 2019). C'est au sein de cet espace que l'on retrouve la majorité des aménagements anthropiques comme les terrasses, les carrières ou encore des réservoirs d'eau et des canaux.

Le secteur, en dehors de ces limites, correspond à ce qui est considéré comme l'arrière-pays du site. Les structures archéologiques y deviennent plus réduites et moins denses, passant à une densité d'1,5 structures par Ha (Hiquet, 2019). Il est à noter que les récentes prospections LiDAR ont montré que la densité résidentielle à l'ouest et au sud-est de Naachtun s'accroissait et qu'à certains endroits (ex : *Kunal* à l'est), il était même possible d'y trouver des pyramides ou des jeux de balle (Nondédéo et Dorison, 2018). Aucun des sondages géoarchéologiques étudiés ne provient de ce secteur.

2). Contextes chrono-stratigraphiques des sondages étudiés.

Le choix des sondages à étudier avec les phytolithes relève des interprétations pédologiques proposées par Castanet et Purdue (2014) et Purdue (2014 ; 2018) lors des campagnes de terrain. En fonction des contextes supposés de ces relevés et des problématiques associées à leur localisation, une sélection de 12 sondages a été effectuée, sur lesquels 1 à 12 échantillons ont été retenus. Ces sondages sont organisés en fonction de 4 contextes déjà cités en introduction : 1) les niveaux supposés agricoles, 2) les niveaux de sols bruns supposés être des amendements, 3) les niveaux supposés être la couverture originelle du site avant son occupation et 4) des zones ayant participé à une irrigation ou un stockage de l'eau sur le site. Cette sous-partie vise à présenter les sondages de ces contextes et leurs problématiques associées.

i). Les niveaux supposés agricoles

Les sondages, qui sont présentés ici, possèdent des niveaux qui ont été interprétés comme des anciens sols cultivés, en terrasses ou en zones planes. Ces sondages sont plus ou moins connectés aux habitats et l'étude de leur contenu phytolithique pourrait permettre de confirmer leur utilisation agricole.

a). THT1

Le sondage THT1 a été réalisé sur la rive du *bajo* nord, à l'est du site (Fig 6.1), dans un système de terrasses échelonnées. Lors du sondage, aucun mur de terrasse n'a été identifié mais il présente des niveaux d'argiles brunes et organiques (UE.3157, US.3158), riches en tessons de céramiques, qui reposent sur des argiles grises à vertes formant la base du sondage (UE.3159). Ces sols bruns pourraient correspondre à d'anciens niveaux cultivés. On note, toutefois, que l'UE.3157 est datée de la fin de la période Postclassique (1453-1539 CE). Ces sols sont scellés par des niveaux argilo-limoneux bruns riches en agrégats d'argiles (UE.3156) issus d'une phase érosive des sols (Castanet et Purdue, 2014). Les 4 unités de sols citées ont été prélevées pour l'étude des phytolithes.

b). T6

Le sondage T6 a été réalisé dans une zone de pente vers le *bajo* au nord-est du groupe C (Fig 6.1). La base du relevé se compose d'un niveau riche en pierres et graviers calcaires dans une matrice argileuse brune-claire à verte. Ces dépôts sont recouverts par des dépôts de sols argileux sombres qui prennent la forme d'une terrasse agricole (Purdue, 2014). Cette terrasse est composée de trois UE qui s'organisent de la manière suivante. L'UE.3226, composée d'argiles grumeleuses brunes à brunes-foncées, repose sur le niveau inférieur de la terrasse. Elle est recouverte par l'UE.3222 composée d'argiles grises, contenant des graviers calcaires et quelques charbons. Enfin, dans la partie supérieure de la terrasse, l'UE 3221 est composée d'argiles brunes-foncées avec des nombreux agrégats d'argiles vertes. Cette dernière UE est datée du Préclassique moyen (813-798 BCE). La terrasse est scellée par une phase de remplissage et de conditionnement par une succession de sols contenant de multiples blocs et pierres (Purdue, 2014). Les trois niveaux de la terrasse ont été échantillonnés pour l'étude des phytolithes.

c). T48-482

Le sondage T48-482 a été réalisé au sein du groupe A, entre la grande place ouest et la pyramide occidentale (Fig 6.1). La base est constituée de sols limoneux, légèrement argileux, polyédriques qui prennent une couleur beige à brun-clair en raison de taux importants de calcaire (UE.2365b). Ces niveaux sont recouverts par des limons bruns à bruns-clairs, riches en

carbonates détritiques, en charbons et en coquilles (UE.2364). L'UE.2363 supérieure se compose de limons-argileux noirs-bruns, de structure grumeleuse, également riches en carbonates secondaires et en charbons (Purdue, 2014). Ces deux derniers niveaux, UE.2364 et UE.2363, constituent une phase interprétée comme l'évolution d'un sol argileux naturellement altéré (US2364) au Préclassique récent, avant d'être exploité à des fins agricoles au cours du Classique ancien (Purdue, 2014). Ces dépôts sont scellés par des niveaux de remblais. 3 échantillons de phytolithes, correspondant à ceux présentés ci-dessus, ont été étudiés pour ce sondage.

d). T51-51a

Le sondage T51-51a se situe dans le secteur du groupe A, au sud de la grande place ouest, à une centaine de mètres du sondage T48-482 (Fig 6.1). La base du sondage est composée d'argiles grises, riches en agrégats, recouvertes par un niveau de graviers. Ces niveaux sont recouverts par l'UE.2377 qui se compose d'argiles limoneuses, à structure friable et riches en matières organiques et en artefacts (Purdue, 2014). L'UE.2376 sus-jacente présente la même structure et composition, à l'exception que la couleur des argiles tend plus vers le brun-foncé et que celles-ci contiennent des charbons. Ces niveaux ont certainement été cultivés au cours du Classique ancien. En effet, ils sont recouverts par des niveaux de remblais correspondant à la phase d'architecture de ce secteur du site.

e). 5N6-S9

Le sondage 5N6-S9 se trouve au sud d'un habitat résidentiel à la limite sud du groupe A (Fig 6.1). La base du sondage est composée d'argiles limoneuses, à structure polyédrique, de couleur grise, que Purdue (2014) interprète comme un possible paléosol (UE.3243 ; UE 3243a). Les UE.3241 et UE.3242 correspondent à des niveaux argilo-limoneux polyédriques gris à verdâtres qui forment une couche assez épaisse mais perturbée par la présence de deux petites fosses. Ces fosses sont formées d'un paléosol, composé d'argiles limoneuses grises à grises-foncées avec des passées plus grossières au cœur des fosses (UE.3240 ; UE.3246 ; UE.3247 ; UE.3248 ; UE.3248a). Ces fosses attesteraient du développement d'une couverture végétale, certainement arborée (Purdue, 2014), qui pourrait être interprétée comme une zone d'exploitation intrasite, comme un jardin-verger, en raison de sa proximité et sa synchronicité présumée avec l'unité résidentielle 5N6. Ce niveau de sol est scellé par des dépôts limoneux polyédriques gris-foncés (UE.3239) datés du Classique terminal (968-814 BCE). Purdue (2014) interprète ce niveau comme un épisode d'altération. Enfin, l'UE.3238 correspond au niveau humique constitué de limons grumeleux. Sur ce sondage, 12 échantillons de phytolithes ont été prélevés (Fig 6.1).

f). T5

Le sondage T5 a été réalisé dans la zone résidentielle à l'ouest du site, dans des niveaux de sols épais pour l'escarpement (Fig 6.1). La base du relevé est constituée par des limons-argileux bruns, de structure grumeleuse (UE.3216). Cette couche est scellée par des limons argileux gris-brun comprenant des traces de matières organiques (UE.3215). Le niveau sus-jacent, UE.3214, est composé d'argiles-limoneuses grumeleuses de couleur grise à brun-foncé. Purdue (2014) interprète ces trois niveaux comme différentes phases d'agriculture. Ils sont recouverts par un niveau érosif, composé d'argiles-limoneuses avec quelques traces de détritisme, notamment des graviers de chaux (UE.3212). Purdue (2014) considère également que ce niveau suggère une exploitation à des fins agricoles. Il est scellé par un dépôt épais d'argiles-limoneuses, polyédriques à grumeleuses et de couleur grise à brun-foncée (UE.3211). Ce niveau présente des coquilles, de la matière organique en décomposition et également un niveau de graviers (Fig 6.1). Enfin, le dernier niveau du sondage, UE.3210, correspond au sol humique de surface. Purdue (2014) interprète l'ensemble de ce sondage comme une succession de niveaux cultivés au sein de la zone résidentielle au cours de l'occupation de Naachtun.

ii). Les niveaux d'amendements de sols

Les deux niveaux, qui sont ici présentés comme un contexte particulier, auraient pu être placés dans la sous-partie ci-avant. Ils présentent, en effet, des niveaux que Castanet et Purdue (2014) ont interprété comme des niveaux agricoles. Pourtant, ces niveaux possèdent des caractéristiques pédo-sédimentaires que les auteurs interprètent comme des amendements issus de la zone humide du *bajo*. L'étude de ces niveaux par les spectres de phytolithes pourrait à la fois confirmer l'utilisation agricole de ces niveaux et également leur provenance de la zone de *bajo*.

Ces deux sondages ont été réalisés dans le patio de l'unité résidentielle 50 au sein du groupe B (Fig 6.1). La base du sondage TNS1 se compose d'argiles grises légèrement verdâtres, déposées sur le substratum (UE.3112 ; UE.3113). Castanet et Purdue (2014) considèrent que ce premier niveau d'argile est exogène et qu'il a été amené depuis d'autres zones pour former un sol. Un réservoir semble avoir été creusé dans ces argiles, entretenu pendant plusieurs étapes, avant d'être abandonné et comblé par un remplissage de limons. Ces niveaux sont scellés par des argiles-limoneuses polyédriques, de couleur brune, qui résulteraient d'une exploitation agricole de ce niveau (UE.3110). Les niveaux sont recouverts par du remblai, indiquant l'installation archéologique qui débute après 381-417 CE, en raison de la date 14C de l'UE.3110 du niveau inférieur.

Le sondage TNS2 témoigne également d'une première phase de dépôts argileux polyédriques, de marron à gris, directement au contact de la roche mère (UE.3127). Castanet et Purdue (2014) interprètent ce niveau comme un apport exogène d'argiles. Ce dépôt est recouvert par des argiles-limoneuses prismatiques qui sont riches en oxyde (UE.3126). Ce même niveau est

scellé par un dépôt d'argiles-limoneuses, plutôt granuleuses avec une couleur brune à noire, qui pourrait résulter d'une exploitation agricole (UE.3125). Les niveaux supérieurs correspondent également à un niveau de remblai archéologique. Il semble qu'il y ait une synchronicité entre ces deux sondages du même patio, indiquant tous les deux un apport d'argiles exogènes (UE.3112 ; UE. 3127) et un sol potentiellement exploité (UE.3110 et UE.3125). Les phytolithes ont été étudiés pour les 6 échantillons cités, afin de trouver des indices paléoécologiques afin de valider ou non ces interprétations.

Enfin, les niveaux de terrasses du sondage T6, UE.3221 et UE3226, déjà prélevés pour l'étude de l'exploitation agricole de la structure, ont également été étudiés pour la question des amendements. Purdue (2014) propose que certains niveaux de sols de couleur sombre puissent provenir de sédiments prélevés dans les zones de *Sival*.

iii). Les niveaux de couverture pédologique naturelle

Pour répondre aux questions d'apports d'argiles amendant les sols sur les zones d'escarpement, il est nécessaire de connaître la couverture pédologique originelle du site avant l'installation des structures archéologiques. Sur au moins deux sondages étudiés, les traces de cette couverture « naturelle » reposant sur des argiles grises-vertes pourraient permettre de comprendre l'évolution des séquences pédologiques à Naachtun en lien avec l'anthropisation.

Le sondage T3 a été réalisé au nord du groupe A, à proximité de la pyramide nommée *La perdida* (Fig 6.1). La base de ce sondage présente des dépôts argileux verts à gris-clairs incluant de nombreux graviers calcaires ou des cristaux de gypse. On passe ensuite à une phase d'argiles limoneuses grises, voire légèrement vertes, à structure polyédrique qui présentent toujours des oxydes et des carbonates secondaires. L'ensemble de ces niveaux est recouvert d'un sol noir, composé d'argiles-limoneuses polyédriques de couleur brun-foncé à brun-noir et incluant des traces de matières organiques décomposées (UE.3197). Ce niveau de sol est interprété par Purdue (2014) comme le développement d'un sol naturel sur un substrat argileux. L'ensemble du sondage est recouvert par un remblai lié à la construction de la pyramide. Seul le niveau de sol naturel a été sélectionné pour l'étude des phytolithes.

Le sondage T7 se situe à l'extrême est du site de Naachtun, à proximité du versant du *bajo nord* (Fig 6.1). La base du relevé est composée d'argiles vertes durcies, à structure prismatique, sont rapidement recouvertes par des argiles grises-brunes à brunes-claires, présentant une structure polyédrique à grumeleuse et contenant des coquilles, des charbons et des traces de matière organique (Purdue, 2014). Cette première phase pédologique va évoluer vers le dépôt d'un premier sol argilo-limoneux, de structure grumeleuse et de couleur brun-foncé qui pourrait correspondre à un premier niveau cultivé (UE.3234), daté de la fin de la période Archaique. Ces niveaux sont érodés par la présence d'un ravin comblé par des niveaux riches en graviers et en blocs dans une matrice de limons bruns à brun-foncés. Une fosse est ensuite creusée et puis comblée d'argiles limoneuses brunes-grises (UE3237a) puis grises-brunes dans

sa partie supérieure. Purdue (2014) n'explique pas la fonction de cette fosse. Deux échantillons de phytolithes ont été prélevés sur le paléosol supposé cultivé mais également sur le premier niveau de la fosse, afin d'en déterminer une potentielle fonction.

iv). Les niveaux en lien avec le stockage de l'eau ou l'irrigation

L'accès à l'eau est une question primordiale sur l'intracite. En effet, le drainage souterrain ou en direction du *bajo* est important et laisse relativement peu de zones humides pérennes naturelles sur le plateau et les versants. L'étude des sources d'eau sur le site paraît donc nécessaire à la compréhension des facteurs d'adaptation des Mayas à ces conditions hydrologiques particulières. Dans nos sondages, une zone d'*aguada* et une zone de canal ont été étudiées.

Le sondage H12-S32 est localisé au sud-ouest de la zone résidentielle (Fig 6.1), sur la marge d'une ancienne *aguada* mise à jour par Purdue (2018). L'étude de la marge de l'*aguada*, plutôt que de son centre, nous permet dans un premier temps de repérer les niveaux d'inondation, donc des périodes de stockage important d'eau et dans un second temps, de comprendre à quel usage est défini la marge de l'*aguada* pendant son utilisation.

La base du sondage est constituée d'argiles-limoneuses polyédriques, grises-brunes qui reposent sur le substrat (UE.3255), daté à la limite Archaique-Préclassique (2110-1889 BCE). L'UE.3255 est marquée par une richesse en agrégats organiques et en charbons. Ce niveau est recouvert par un épais dépôt argileux brun-gris, contenant de nombreux tessons de céramiques (UE.3254) et qui présente des inclusions riches en petits graviers (UE.3256) ou constituées d'argiles plus claires (UE.3256). Ces niveaux sont scellés par un sol argilo-limoneux polyédrique compact, de couleur gris-foncé, contenant de la matière organique altérée (UE.3253). Enfin, cette succession pédologique est recouverte par un dépôt de graviers calcaires dans une matrice limoneuse, avant d'être scellée par le niveau humique (UE.3251). Purdue (2018) suggère que cette séquence représente l'évolution d'une zone humide naturelle du site, dont les dépôts auraient évolué en fonction de l'anthropisation, voire de la culture en marge de l'*aguada*, notamment le niveau UE.3253 daté du Préclassique ancien (419-560 CE).

Castanet et Purdue (2014) ont effectué un sondage dans le canal qui coupe le site en deux hémisphères et qui s'écoule vers le *bajo* nord (Fig 6.1). La base du sondage présente des niveaux argileux verts à gris, qui indiquent d'importants blocs calcaires. Le niveau sus-jacent, l'UE.3137, possède la même composition pédologique mais est dépourvu de bloc calcaire. Ces niveaux sont scellés par un dépôt argilo-limoneux gris-clair, présentant une texture granuleuse (UE3132b ; UE.3132a) et qui atteste de processus pédologiques changeants (Castanet et Purdue, 2014). Ces dépôts du canal sont visiblement creusés, ce qui se traduit ensuite par l'enregistrement d'un niveau grossier, avec de nombreux blocs dans une matrice argileuse. Après une phase de comblement, on observe arriver des dépôts argileux d'érosion, de couleur grise à verdâtre (UE.3129), avant l'enregistrement d'un sol humique. L'intérêt principal de l'étude

de ce canal vient du fait que des niveaux bruns observés sur le côté nord de la tranchée ont pu être exploités à proximité de la source d'eau du canal.

3. L'utilisation des phytolithes en contexte intrasite

L'approche par assemblage a été menée pour l'étude des référentiels modernes (Chapitre 3 ; Chapitre 4) et des sédiments du *bajo* (Chapitre 5). À la vue du bon fonctionnement, elle a été renouvelée dans l'étude des échantillons de ce chapitre. Toutefois, il est nécessaire de préciser que l'ensemble des échantillons étudiés jusqu'à alors est considéré comme ayant été enregistré de manière *in-situ*, c'est-à-dire où le déplacement des particules est réduit (Madella et Lancelotti, 2012). Dans notre système hydrologique fermé et avec des processus de drainage réduits, cette règle nous a permis d'interpréter nos assemblages. Toutefois, de nombreux processus participent à l'enregistrement des phytolithes à l'écart de leurs zones de production (Fredlund et Tieszen, 1994 ; Wallis, 2001 ; Cary et al., 2005 ; Garnier et al., 2013).

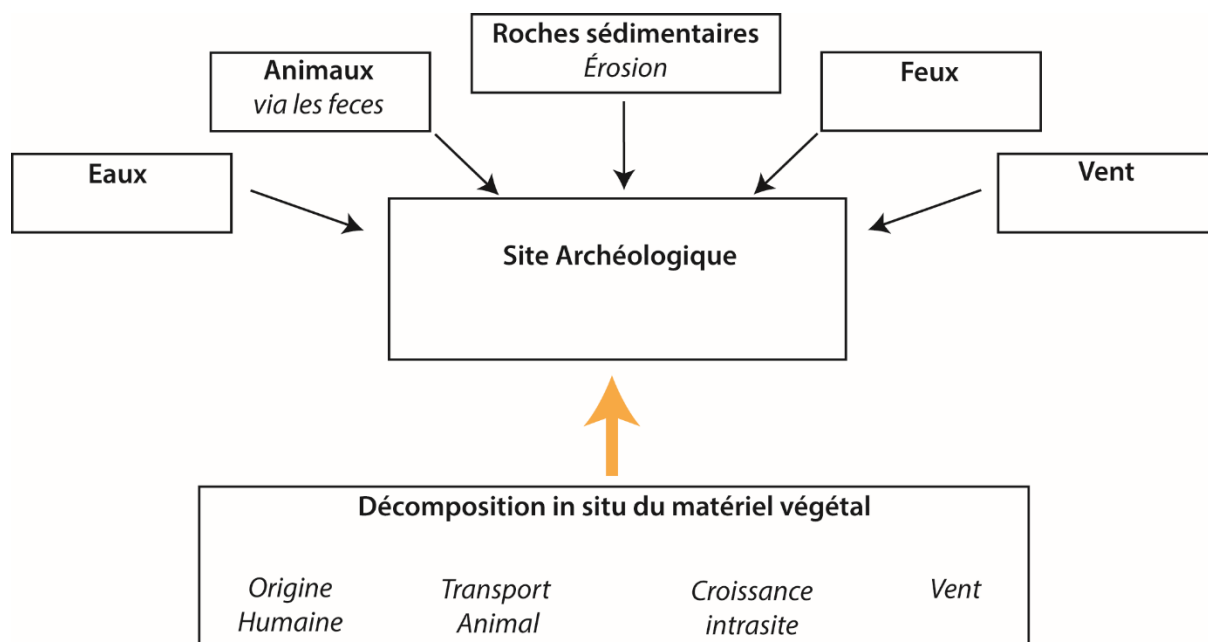


Figure 6.2 : Représentation schématique des principaux mécanismes par lesquels les phytolithes peuvent être introduits dans les sites archéologiques (modifié d'après Wallis, 2001)

Aujourd'hui, il est attesté que les pratiques humaines ont un rôle dans la formation des assemblages de phytolithes, du fait de leur impact sur les écosystèmes (Rovner, 1988 ; Wallis, 2001 ; Piperno, 2006). Cela a été vérifié au sein du Chapitre 5 où certaines formations végétales sont héritées de l'agriculture. Toutefois, l'étude des sondages au sein du site de Naachtun amène une nouvelle interrogation qui concerne l'origine et les modes d'introduction des assemblages de phytolithes dans un site archéologique (Fig 6.2).

Ainsi, l'exploitation de cultigènes intrasites, l'amendement de sols par apports de matières organiques depuis les zones, l'amendement pas d'autres végétaux (fanés et feuilles), les zones de composts, l'entretien et désherbage des parcelles, l'agroforesterie favorisant la présence de gibier, ou encore les dépôts de fèces ne correspondent qu'à une énumération incomplète des nombreuses sources de perturbation du signal phytolithique. Ainsi l'interprétation d'un assemblage de phytolithes fossiles en contexte intrasite est généralement plus délicate que les zones dites "naturelles". Si les analogues des écosystèmes modernes nous permettent de calibrer nos interprétations paléoenvironnementales, il est possible que dans ce cadre archéologique, ils soient moins utiles qu'une approche taxonomique des phytolithes de cultigènes.

II. Résultats sur les assemblages de phytolithes de phytolithes en contexte intrasite

Au total, cette étude porte sur 49 échantillons de phytolithes, prélevés au sein de 12 sondages, répartis de 1 à 12 échantillons par sondage (Fig 6.1). Ce qui ressort des résultats, d'une manière générale c'est que seul 25% des échantillons a fourni des assemblages interprétables et que 5 sondages ne présentent aucun échantillon exploitable (Fig 6.3). Sur les 13 échantillons étudiés et utilisables, 4 proviennent de niveaux de surface et de sub-surface et plus de la moitié des échantillons exploitables (8) sont conservés dans les sondages THT1 et 5N6-S9, qui sont également les deux seuls sondages qui présentent une série d'échantillons interprétables. Malgré ces résultats nuancés, la description des phytolithes de ces sondages peut tout de même apporter quelques informations paléoécologiques.

1. Les contextes d'agriculture

i). Le sondage THT1

Le sondage THT1 est le seul sondage où l'ensemble des échantillons prélevés a donné des assemblages interprétables (Fig 6.3). On y distingue deux phases bien distinctes.

Les deux échantillons basaux du sondage, UE.3159 et UE.3158, montrent des indices D:P relativement moyens, compris entre 1,16 et 1,23, indiquant un environnement relativement mixte avec des ligneux et une composante herbacée importante. En effet, les taux importants de *Sclereid* (respectivement de 17% et 15%) et moyens de *Globular mixed* (32% et 31%) indiquent la présence d'une strate arborée. En revanche les concentrations de 29% et 30% de *GSSCP* (dont la moitié de formes *Lobate*) et les taux de *Papillae* « autres » atteignant 10% pour les deux échantillons montre que les formations herbacées sont bien représentées dans cet écosystème. Les taux de phytolithes diagnostiques ne présentent pas de variations importantes, même si pour ces échantillons, ils sont en moyenne 5% à 6% plus importants que la phase supérieure. Les taux de spicules et de diatomées sont résiduels et inférieurs à 1%.

La phase supérieure est constituée des deux échantillons UE.3157 et UE.3156. Cette fois-ci, l'indice D:P est plus élevé, respectivement de 5,22 et 4,25, indiquant une disparité dans les

phytolithes de ligneux et d'herbacées. En effet, si les taux de *Sclereid* s'effondrent à 5%, les concentrations de *Globular mixed* remontent à 50% indiquant un environnement forestier relativement dense. Cependant, alors que les phytolithes de palmiers, de type *Globular echinate*, avaient enregistré des taux moyens dans la phase précédente, ces échantillons présentent des valeurs de 34% et 32% témoins d'une communauté importante d'Arecaceae dans cette forêt. Dans le même temps, les phytolithes de type *GSSCP* diminuent à 9% et 11% et les phytolithes *Papillae* sont maintenus inférieurs à 2%, montrant une raréfaction des plantes herbacées.

Au sein de ce sondage, on peut observer le passage d'un environnement relativement ouvert avec une formation herbacée importante, vers un environnement forestier riche en palmiers semblables aux communautés végétales modernes du sondage en question. Cette transition a eu lieu avant la fin de la période Postclassique.

ii) Le sondage 5N6-S9

Le sondage 5N6-S9 correspond au second sondage où plusieurs échantillons sont interprétables. Toutefois, ceux-ci ne sont pas regroupés en phase et doivent être interprétés un à un.

L'échantillon UE.3243 situé à la base du sondage (Fig 6.1) présente un indice D:P moyen de 3,65 qui s'explique par une légère domination des morphotypes de ligneux, avec notamment 70% de *Globular mixed*, attestant d'une dense végétation forestière. Les morphotypes de *GSSCP*, dominés par les *Saddle* et les *Rondel*, représentent 20% de l'assemblage (Fig 6.3) indiquant la présence d'un sous-bois d'herbacées. Parmi les phytolithes non-diagnostiques, on trouve des valeurs de *Flabellate* et de *Blocky* de 8% et 12% et des *Elongate* à 7%.

L'échantillon sus-jacent UE.3241 présente un indice D:P très élevé de 153, qui traduit la domination des *Globular mixed* (76%) et l'absence remarquée des *GSSCP* et *Papillae* atteignant pour les deux une valeur inférieure à 1%. Cet assemblage enregistre un taux de *Globular echinate* assez important (21%). Les phytolithes non-diagnostiques sont assez peu exprimés. Cet échantillon peut être interprété comme un environnement forestier avec un sous-bois d'Arecaceae bien marqué.

L'échantillon UE.3248a présente également un indice D:P assez élevé avec une valeur de 12,13. La concentration des *Globular* augmente à 82% et celle des *Sclereid* à 6%. Cela indique toujours la présence d'un environnement forestier. On retrouve toujours des valeurs faibles de *GSSCP*, quoiqu'un peu plus prononcés pour ce niveau, avec des valeurs cumulées de 7% traduisant une rareté des herbes en sous-bois. Cet échantillon présente quelques phytolithes de *Globular facetate*, comptant pour 1% de l'assemblage, qui sont interprétés comme une production de plante Cucurbitaceae. Les phytolithes non-diagnostiques enregistrent des valeurs importantes, respectivement 11% pour les *Flabellate*, 26% pour les *Blocky* et 20% pour les *Elongate*.

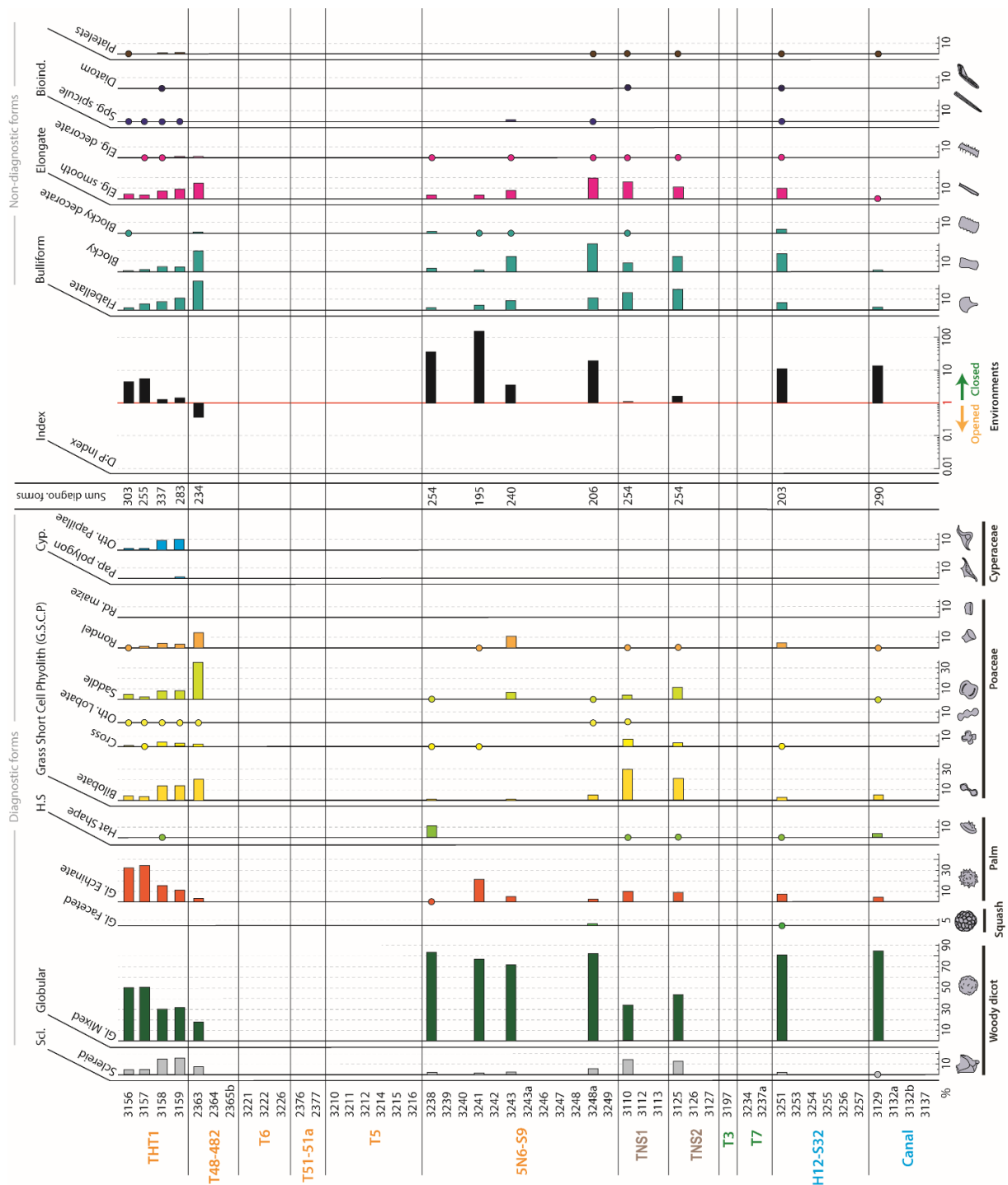


Figure 6.3 : Diagramme des assemblages de phytolithes des échantillons de sondages intrasites de Naachtun. Les points sur le diagramme indiquent les valeurs inférieures à 1%.

Enfin, le niveau de surface, UE.3238, présente un indice D:P relativement important, de 36,33 indiquant une zone forestière dense. Cela s'explique par la domination des *Globular mixed* (82,7%), la rareté des *GSSCP* (< 2.5%) et l'absence de *Papillae*. On remarque que les phytolithes Hat shape, absents dans les autres assemblages, sont ici bien représentés avec un taux de 11% de l'assemblage. Enfin, on observe de faibles pourcentages pour les phytolithes non-diagnostiques (autour de 3% pour chacun des morphotypes). Cet assemblage est comparable à ceux observés dans l'actuel dans la zone du sondage.

iii). Le sondage T48-482

Ce sondage n'a fourni qu'un seul échantillon exploitable, (UE.2363). Il présente un indice D:P particulièrement faible de 0,36. Ce résultat s'explique par des valeurs de *Sclereid* et de *Globular mixed* relativement faibles, respectivement de 7% et 17%, alors que les *GSSCP* représentent 71% de l'assemblage dont la moitié est composée par les morphotypes *Saddle*. L'interprétation de cet assemblage correspond à une formation de Poaceae dominante. Les phytolithes *Papillae* sont en revanche absents. On note pour cet assemblage des taux de morphotypes non-diagnostiques importants dont 27% de *Flabellate*, 19% de *Blocky* et 14% d'*Elongate*.

2. Les contextes d'amendement

Les sondages TNS1 et TNS2 ont chacun fourni un échantillon interprétable qui correspond à une phase supposée contemporaine pour les deux sondages. Il s'agit des échantillons UE.3110 et UE.3125.

L'échantillon de TNS1, UE.3110, présente un indice D:P de 1,09 indiquant un assemblage mixte et un environnement relativement ouvert. En effet, on observe 14% de *Sclereid* et 32% de *Globular mixed*, qui sont compensés dans le calcul de l'indice par 43% de *GSSCP*, dominé à plus de la moitié par des *Bilobate*. Les taux de phytolithes non-diagnostiques sont également très importants avec 16% de *Flabellate*, 9% de *Blocky* et 15% d'*Elongate*. On remarque enfin que les taux de spicules et de diatomées sont très résiduels (< 1%).

L'assemblage de TNS2, UE.3125, est relativement semblable à TNS1. L'indice D:P est légèrement supérieur avec une valeur de 1,60. On retrouve donc 11% de *Sclereid* et 44% de *Globular mixte* et du côté des phytolithes produits par les Poaceae, 35% de l'assemblage est représenté par les *GSSCP* dont 20% de *Bilobate*. Cet assemblage est également interprété comme un environnement relativement ouvert. Les morphotypes non-diagnostiques sont également bien représentés avec 20% de *Flabellate*, 14% de *Blocky* et 11% d'*Elongate*. Encore une fois, les taux de spicules d'éponges et de diatomées sont résiduels (< 1%).

3. Les contextes de stockage d'eau et d'irrigation

Dans les deux sondages étudiés pour ce type de contexte, seuls les échantillons de surface ou sub-surface sont interprétables.

Le niveau de surface de H12-S32, UE.3251, présente un indice D:P fort, avec une valeur de 10,62 témoignant d'une végétation moderne de forêt. On retrouve en effet des concentrations importantes de *Globular mixed*, (81%) indiquant des ligneux alors que les concentrations

de *GSSCP* sont de 8% et les *Papillae* absentes. Les morphotypes non-diagnostiques sont relativement importants, avec 7% de *Flabellate*, 16% de *Blocky* et 10% d'*Elongate*. On note la présence d'un morphotype de *Globular facetate* relativement aplani. Enfin, les spicules d'éponges et les diatomées présentent une nouvelle fois des valeurs résiduelles.

Le dernier échantillon ayant fourni une information écologique correspond au niveau de sub-surface du canal, UE.3129. L'assemblage montre un indice D:P de 13 qui s'explique par une importante concentration de *Globular mixed* (85%) et de faibles valeurs cumulées de *GSSCP* (6%) indiquant une forêt avec un sous-bois pauvre en herbacées. Les *Globular mixed* et *Hat shape* présentent respectivement des taux à 5% et 4% correspond à de petites populations de palmiers. Les valeurs de morphotypes non-diagnostiques sont faibles (< 2%) et les spicules d'éponges et diatomées sont absentes des assemblages.

III. Interprétation paléoécologique et taphonomique des assemblages de l'intrasite

1. Reconstitution paléologique des environnements intrasites de Naachtun

i). Indice en faveur d'un jardin-verger à Naachtun (5N6)

Seuls deux sondages présentent un niveau avec des phytolithes *Globular facetate* interprétables comme héritage d'un dépôt de Cucurbitaceae (Piperno et al., 2000). Ce sont les seuls phytolithes qui sont directement interprétables comme des traces de cultigènes dans l'ensemble des échantillons étudiés. Il reste toutefois à interpréter ces phytolithes comme témoins d'une végétation particulière.

L'échantillon de surface de H12S32 pose question par la présence d'un phytolithe de type *Globular facetate*. L'assemblage correspond à une environnement forestier moderne de l'escarpement de Naachtun. Les Cucurbitaceae sauvages ne poussent que dans les milieux de *bajo* et proche des milieux ouverts (Standley et Steyermark, 1946). La forme très aplaniée du morphotype pourrait attester d'une origine taxonomique différente, comme certains morphotypes de *Globular facetate* observés par Novello et al. (2018) chez des plantes Myrtaceae. Il peut également s'agir d'un phytolithes remaniés. Dans tous les cas, cette trace ne peut pas être utilisée pour discuter de paléoécologie.

L'échantillon UE.3248a est plus à même de nous faire penser à un dépôt d'enregistrement de Cucurbitaceae de l'époque maya. Ce niveau est scellé par une couche datée du Préclassique moyen (968-814 BCE) et il se situe sur un sol interprété comme issu d'une végétation forestière en place (Purdue, 2018). Le sondage est positionné dans une zone vide de structure, à proximité de l'unité résidentielle 5N6. Toutefois la datation disponible indiquerait que cette structure n'est pas contemporaine de cette phase. L'identification pour cette unité sédimentaire de plusieurs phytolithes *Globular facetate* nous pousse à interpréter ce sol comme agricole, avec une exploitation des courges. Par ailleurs, l'assemblage de cette unité dominé par des phytolithes de ligneux avec des traces d'herbacées rares contribue à appuyer l'hypothèse d'une végétation forestière développée par Purdue (2018).

On peut interpréter ce niveau comme une zone où les courges sont cultivées à proximité de ligneux, qui dans un jardin-verger sont généralement organisés en strates d'arbres utiles (Ford, 2008). Sur cette seule base, il semble toutefois prématuré de valider l'existence d'une agroforesterie sur le site. En effet, ce niveau pourrait très bien être interprété de différentes manières, pour exemple, l'abandon de déchets de cuticules de courges avec des déchets végétaux provenant de ligneux (branche, fruit, feuille, etc.). Par ailleurs, les fortes concentrations de phytolithes non-diagnostiques dans ces niveaux pourraient nous permettre d'argumenter sur l'une ou l'autre hypothèse. Cet aspect des assemblages est discuté dans une sous-partie ci-dessous.

ii). Des assemblages ouverts au cours de l'occupation de Naachtun

L'analyse de la représentation cartographique des assemblages fossiles de Naachtun (Fig 6.4), nous permet de faire ressortir l'importance des composantes herbacées, souvent supérieures à 40%, pour les échantillons datant de la période d'occupation du site.

C'est le cas pour la phase d'argiles brunes polyédriques de TNS1 et TNS2, datée du Classique ancien, où les deux sondages sont riches en phytolithes *Bilobate*, indicateurs de Panicoïdeae. L'échantillon d'argiles brunes grumeleuses du sondage T48-482 est temporellement calé au Préclassique récent - Classique ancien, par une date à 404-209 BCE sur le niveau inférieur d et la construction de la chaussée du groupe A au Classique ancien. L'assemblage est riche en forme *Saddle*, indiquant la présence de Poaceae, potentiellement des bambous ou des Arundinoïdeae, mais également en Lobate ce qui indique plutôt les Panicoïdeae.

Concernant le sondage THT1, la première phase, constituée des UE.3159 et UE.3158, est marquée par des assemblages qui montrent des concentrations de phytolithes d'herbes à hauteur de 40%, dont 10% de *Papillae* observés uniquement pour ces unités sédimentaires. Ces assemblages sont très proches de ceux observés en M1S2c sur des niveaux Préclassiques (Chapitre 5). L'absence de date nous empêche de les corrélérer, mais il est possible de poser l'hypothèse qu'ils soient contemporains.

L'ensemble de ces dépôts est supposé contemporain de l'occupation du site par les populations mayas sur une période Préclassique moyen à Classique ancien. Les environnements modernes du Petén montrent que les escarpements calcaires sont naturellement enclins à développer des forêts-hautes calcicoles et que les zones de savanes sont limitées à certains contextes géologiques sur les escarpements (Lundell, 1937 ; Martínez et Galindo-Leal, 2002). Il semble alors évident que l'enregistrement d'assemblages ouverts dans les échantillons du site ne soit pas hérité d'une végétation naturelle mais bien d'une perturbation de la végétation et très certainement due aux populations humaines.

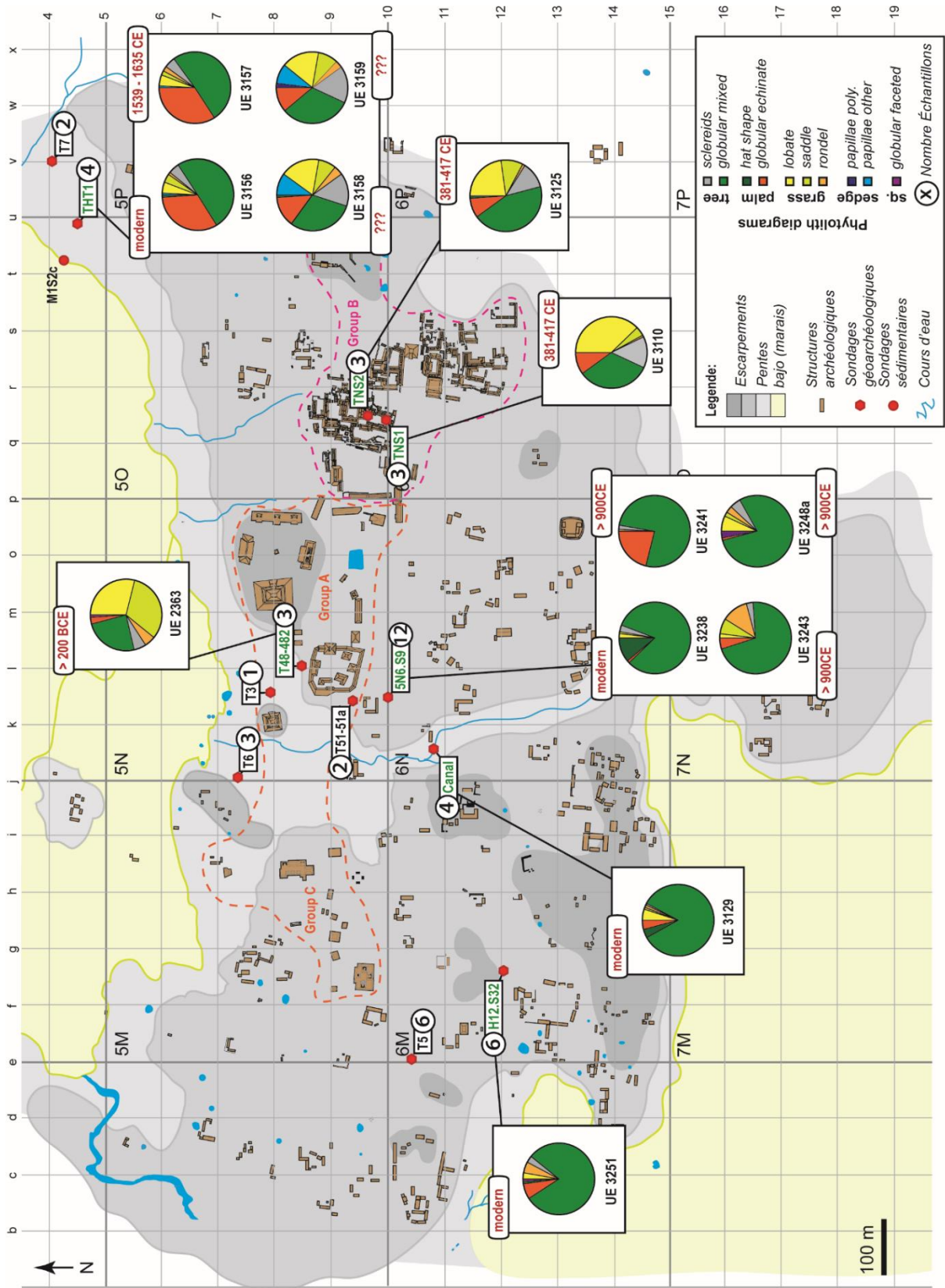


Figure 6.4 : Carte simplifiée de Naachtun indiquant la répartition spatiale et temporelle des assemblages de phytolithes diagnostiques des échantillons interprétables. Les sondages ayant donné au moins un assemblage interprétable sont indiqués en vert.

Toutefois, et en l'absence de traces de cultigènes plus marquées, il semble difficile de trancher sur l'origine de ces assemblages, pour savoir s'il s'agit d'une communauté végétale s'étant développée in-situ ou si ce sont des apports exogènes de végétation.

On notera une nuance pour les assemblages herbeux de THT1, très semblables à ceux trouvés dans le *bajo*. Ceux-ci semblent s'être développés sur place et former une connexion écologique entre les zones d'escarpements et celles du *bajo*.

iii). Discussion sur les amendements de culture

L'un des premiers types d'amendement, proposé par Castanet et Purdue (2014) et Purdue (2014), concerne l'apport d'argile depuis la zone humide de *Sival* du *bajo* nord vers les espaces de la cité. Les résultats phytolithiques ne présentent que des taux résiduels inférieurs à 1% de spicules d'éponges et de diatomées (Fig 6.3). L'étude des environnements modernes de *bajo* avec les phytolithes (Chapitre 3 -Testé et al., 2020) a montré que les environnements en eau, même saisonnièrement, présentaient des assemblages riches en spicules et/ou en frustules. Sur cette base, l'absence de ce type de microfossiles dans les échantillons de l'intrasite suggère qu'aucun indice n'est disponible pour parler d'amendement du *bajo* vers les sols de terrasses du versant ou vers l'intrasite.

En revanche, les assemblages de phytolithes non-diagnostiques peuvent nous amener à pousser la discussion des amendements vers de possibles paillis. Le diagramme des assemblages (Fig 6.3) indique que les niveaux considérés comme cultivés sont composés de fortes valeurs de phytolithes *Flabellate*, *Blocky* et *Elongate*. Aucun de nos assemblages modernes des zones forestières ou ouvertes n'a montré des taux aussi importants et répétitifs de ce type de phytolithes (Chapitre 3 ; Chapitre 4). Les phytolithes *Flabellate* (ou *Cuneiform*) sont considérés comme produits en grande quantité dans les feuilles d'herbes, Poaceae ou Cyperaceae (Chapitre 2). Alors que leur accumulation est rare dans les assemblages modernes, la présence de forts pourcentages dans les niveaux intrasites fossiles pourrait indiquer une accumulation de ces feuilles. Toutefois, les travaux en physiologie végétale ont montré que la silicification des cellules *Cuneiform* se produit préférentiellement lorsque les espèces normalement cultivées en conditions sèches sont cultivées en conditions humides (Sangster et Parry, 1969). Bremond et al., (2005) proposent que ces phytolithes soient produits préférentiellement pendant les périodes de forte transpiration ou de stress hydrique (Bremond et al., 2005).

Ces fortes accumulations de phytolithes non-diagnostiques pourraient être indicatrices d'un paillage des sols, avec des fanes et des tiges d'herbes ou encore des feuilles de dicotylédones. Elle pourrait également être le fait d'un assemblage, ou bien d'un changement dans les pratiques d'irrigation dans l'intrasite. Toutefois, les pourcentages importants de *Bulliform* contenus dans l'échantillon de surface de H12-S32 (Fig 6.3) questionne la possibilité de la forte production de ces morphotypes dans un contexte plus naturel. En effet, dans ce contexte humide de proximité à une ancienne *aguada*, il est possible que des événements de sécheresse jouent un rôle dans la production de certains phytolithes par les plantes. Il s'agit d'une hypothèse

posée, que l'échantillonnage de sols de jardins-vergers modernes avec des pratiques de paillage ou d'accumulation de matière végétale pourrait permettre de calibrer.

2. Discussion sur les effets taphonomiques des assemblages.

L'étude paléoécologique n'a pas pu être aboutie en raison d'un problème de conservation des assemblages dans la plupart des sondages. Ces résultats relativement contrastés, présentant des assemblages très bien conservés et d'autres stériles de phytolithes, posent questions. Il peut s'agir d'un problème concernant le protocole de préparation mais également d'un problème de taphonomie des échantillons. Nous proposons, ici, de discuter des différents indices pouvant expliquer ces résultats.

Le référentiel des assemblages d'écosystèmes modernes (Chapitre 3) a montré que les phytolithes étaient dans la plupart des cas bien conservés. Seuls 3 échantillons modernes sur 43 se sont révélés non-interprétables. Dans le travail présent, à l'exception de l'échantillon de surface UE.3210 de T5, l'ensemble des échantillons de surface ou sub-surface a livré des assemblages interprétables (Fig 6.3). Il semble alors difficile de considérer que le problème provienne du protocole de préparation de nos échantillons.

Cependant, afin d'en être certains, nous avons proposé de mener des phases de nouvelles préparations avec deux nouveaux protocoles et des opérateurs différents sur une trentaine d'échantillons (tous les échantillons, à l'exception des sondages H12-S32 et 5N6-S9).

La préparation de nos assemblages s'inspire de Neumann et al. (2009) et s'organise selon les étapes suivantes : 1) une dégradation des molécules organiques par des bains d' H_2O_2 , 2) une défloculation des argiles par une agitation nocturne des sédiments dans de l'Hexaméthaphosphate de Sodium, 3) un tamisage mécanique pour éliminer les sables, 4) une phase d'élimination du surnageant de multiples décantations pour éliminer les argiles, 5) une centrifugation à l'eau puis à la liqueur dense ($d=2,30-2,35$), avant 6) un lavage à l'éthanol et une phase de séchage.

En raison de nombreux oxydes contenus dans les argiles, la première phase de destruction de la matière organique à l' H_2O_2 était généralement longue (>3 semaines) et a pu entraîner des dissolutions de particules. Ainsi, dans un nouveau protocole, nous avons limité à trois jours cette première phase. La seconde phase, de défloculation par agitation dans un agent dispersant, se déroulait dans des grands volumes entraînant des mouvements pouvant être responsables de l'érosion des phytolithes. Un autre protocole développé a réduit la contenance des volumes d'agitation afin de limiter ce risque mécanique. Au final, ce sont 90 échantillons qui ont été testés, afin de s'assurer que la préparation n'était pas en cause dans les résultats intrasites de l'étude des phytolithes.

Ces trois protocoles de préparation n'ont pas modifié les premiers résultats et sur les 31 échantillons testés, seuls les 8 échantillons ayant enregistré des assemblages fossiles initialement en ont également présenté avec les nouveaux protocoles. Il devient à ce stade peu probable que l'absence de phytolithes dans les trois quarts des échantillons de l'intrassite vienne des protocoles de préparation. Il faut alors se tourner vers les informations relatives à la taphonomie de ces dépôts.

De nombreuses hypothèses peuvent être énumérées concernant le mauvais enregistrements des phytolithes dans les sols de l'intrassite. Des raisons pédologiques comme la mauvaise conservation des phytolithes dans les sols alcalins (Frayse et al., 2009) ou encore des raisons taphonomiques liées aux pratiques humaines comme le piétinement ou le maintien de sol nu (Madella et Lancelotti, 2012). Enfin, dans ces niveaux perturbés, un échantillonnage non-adapté ou trop diffus sur un profil pourrait nous porter préjudice. Dans tous les cas, il est manifeste qu'avec les données disponibles, il n'est pour le moment pas possible de trancher sur les causes de la mauvaise conservation des phytolithes. Les processus sont multiples et encore mal connus pour conclure sur les hypothèses proposées.

Conclusion :

Les questionnements concernant les pratiques agricoles maya en contexte intrassite ont été développés à Naachtun grâce aux travaux géoarchéologiques menés depuis 2010 (Castanet et Purdue, 2014 ; Purdue, 2014 ; 2018). De plus, la campagne LiDAR réalisée à Naachtun, a permis le recensement des espaces vides de la zone résidentielle. L'utilisation des phytolithes dans ce contexte intrassite offrait ainsi la possibilité de tester des hypothèses concernant l'exploitation agricole de niveaux de sols préhispaniques ou encore les pratiques d'amendements de sols depuis des sources de *bajo*. Ainsi, 12 sondages ont été sélectionnés et 49 échantillons ont été prélevés dans le but de conduire une analyse des phytolithes.

Les résultats obtenus ne répondent pas aux attentes paléoenvironnementales. En effet, seul un quart des échantillons a livré des assemblages de phytolithes exploitables, soit 13 échantillons, dont 4 concernent des niveaux modernes ou sub-modernes. Ainsi, les conclusions paléoenvironnementales sont relativement restreintes.

Seul un sondage, 5N6-S9, présente un échantillon avec des phytolithes de cultigènes, des courges et permet d'attester d'une pratique de l'agriculture à proximité d'unité résidentielle. Par ailleurs, des assemblages à riche composante herbacée ont bien été identifiés au sein des sondages pour des niveaux archéologiques contemporains à l'occupation de Naachtun mais n'apportent qu'une information de perturbation des milieux forestiers naturels, que les structures archéologiques denses fournissent déjà. Les morphotypes non-diagnostiques des assemblages semblent apporter une information taphonomique sur la pratique de paillis mais en l'absence d'analogues modernes sur les jardins-vergers, ces propositions s'avèrent rester à l'état de piste de réflexion.

Si les protocoles de préparation peuvent être écartés d'une mauvaise préparation des échantillons, de nombreuses autres hypothèses taphonomiques restent ouvertes pour tenter d'expliquer ces résultats décevants. En l'état, et avec notre méthodologie analytique actuelle, il semble que les phytolithes ne soient pas des bioindicateurs propices aux questionnements géoarchéologiques intrasites à Naachtun.

- RÉSUMÉ DU CHAPITRE 7 -

Éléments d'histoire environnementale à Naachtun au sein des basses-terres centrales mayas

Ce chapitre discute les résultats obtenus par l'ensemble des groupes de travail du projet Naachtun. Ainsi, sont mobilisées les productions de ce manuscrit, à savoir les assemblages de bioindicateurs, les travaux de géomorphologie et de géoarchéologie, respectivement menés dans la zone de *bajo* et l'intrasite, et enfin les connaissances archéologiques. Les interprétations produites sont confrontées aux données paléoenvironnementales et paléoécologiques des basses-terres mayas. Le chapitre propose ainsi de retracer les évolutions du territoire de Naachtun et de les mettre en relation avec les connaissances anthropologiques régionales. Ces reconstitutions socio-environnementales permettront de comprendre si les évolutions observées à Naachtun relèvent de facteurs climatiques ou anthropiques, et d'évaluer finalement l'impact des populations maya sur leurs écosystèmes.

La première partie cherche à interpréter le signal précoce d'ouverture de la végétation à Naachtun. L'histoire environnementale des *bajos* et zones humides de la région incite à valider une origine anthropique de la perturbation au Préclassique ancien.

La seconde partie s'intéresse aux courbes de concentrations des carbonates dans les sédiments du *bajo* afin de les comparer aux données de bioindicateurs. L'ensemble des signaux paléoécologiques et paléoclimatiques de la région tendent à proposer l'existence d'une zone lacustre sur la partie ouest du *bajo* au cours du Préclassique moyen.

La troisième partie présente des assemblages de phytolithes qui ont enregistré les premières traces de maïs à Naachtun au Préclassique récent. Ces assemblages correspondent à un niveau de sols argileux riches en matière organique oxydée, mais aussi en bioindicateur de zones d'eau pérenne. Les rapports C:N montrent des valeurs comparables à la culture de maïs en zone humide dans la région. L'interprétation proposée est celle d'une zone de champs surélevés, comme le LiDAR de Naachtun en a observé dans le *bajo*. A cette période, d'autres types de pratiques comme l'agroforesterie sont supposées dans le *bajo* de Naachtun.

La quatrième et la cinquième phases concernent les questionnements d'occupation du *bajo* au cours de la période Classique et post-Classique. Malgré une importante sécheresse au début de la période Classique, les populations démontrent une capacité d'adaptation aux changements environnementaux en réoccupant de manière totalement différente un *bajo*, pourtant en partie comblé par les produits de l'érosion des escarpements du site. Si les traces d'occupation disparaissent à la fin de la période classique, les Mayas ont montré, au cours de cette étude, leur capacité de résilience aux changements, environnementaux de leur cadre de vie.

- CHAPITRE 7 -

Éléments d'histoire environnementale à Naachtun au sein des basses-terres centrales mayas

Introduction :

L'ambition de ce dernier chapitre est de combiner l'ensemble des connaissances produites lors des différents travaux de recherche menés au cours de cette thèse, avec pour intention première, de proposer une histoire environnementale du site de Naachtun au cours de l'Holocène terminal, ou autrement dit, des 3500 dernières années. Ainsi, les données écologiques construites depuis les sédiments du *bajo* ont été mises en parallèle de celles obtenues sur les sondages intrasites (Fig 7.1). Les interprétations, qui en ressortent, sont calibrées par le référentiel écologique publié des environnements modernes de Naachtun (Testé et al., 2019), mais également, depuis le référentiel des environnements anthropisés de Uaxactún. Il serait prétentieux de considérer que les travaux présentés dans ce manuscrit suffiraient seuls à reconstituer ce récit. Bien évidemment, ces interprétations sont ajustées en fonction des connaissances géomorphologiques, géoarchéologiques mais aussi archéologiques acquises à Naachtun (Fig 7.2). Car finalement, si ce travail de recherche concerne, de par ses outils, les écosystèmes du passé, c'est bien une reconstitution des interactions sociétés-environnements à Naachtun qui est ici proposée.

Cette conception socio-environnementale de l'histoire de Naachtun se reflète dans l'histoire régionale des basses-terres mayas. L'Holocène terminal de cette région est avant tout marquée par l'occupation humaine, notamment du développement de la civilisation maya. Ce souci des relations entre les sociétés humaines et la nature concerne une majorité des travaux récents en sciences naturelles et historiques qui se penchent sur les basses-terres de la Péninsule du Yucatán. Cela se traduit par la disponibilité d'une somme de connaissances naturalistes, de données paléoenvironnementales et archéologiques. Si l'étude de Naachtun participe à étoffer ces savoirs sur la région, dans le cadre de ce chapitre, c'est bel et bien leur mobilisation qui a permis d'affiner nos interprétations et de proposer cette histoire socio-environnementale du site.

I. Un défrichement archaïque et anthropique à Naachtun (2000 – 1600 BCE)

1. Un environnement ouvert au sein du *bajo* de Naachtun à 1600 BCE

i). Un signal d'ouverture ...

L'indice le plus ancien d'une ouverture des communautés végétales à Naachtun intervient, au minimum, au cours du Préclassique ancien (>1600 BCE) dans le sondage sédimentaire M2S10 (Fig 7.1 ; Fig 7.2). Cet épisode est identifiable par l'apparition graduelle d'une communauté herbacée (Poaceae, principalement des Panicoïdeae, et Cyperaceae) au sein de la zone de *bajo*, au détriment des dicotylédones ligneuses. Cette ouverture de la végétation

apparaît, dans les sédiments dont la mise en place est antérieure à 1615-1303 BCE. Il est probable que ce processus d'ouverture de la végétation en M2S10 soit plus ancien que la période du Préclassique ancien et remonte à la période archaïque. Cette proposition sera discutée ci-dessous.

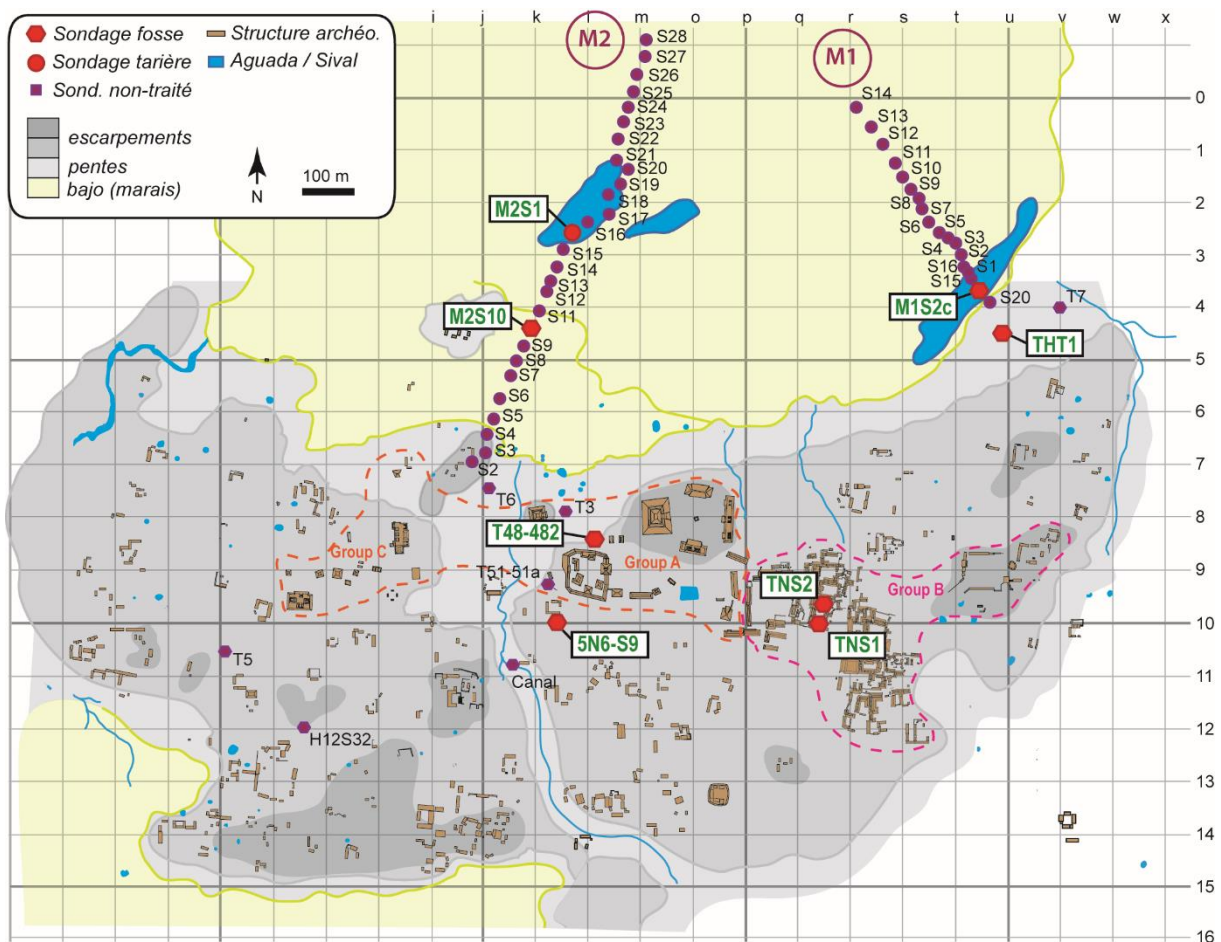


Figure 7.1 – Plan simplifié du site de Naachtun indiquant la localisation des sondages géomorphologiques et géoarchéologiques étudiés au cours de ce travail doctoral.

ii). ... mais limité à un espace local !

Cette date très précoce correspond au plus vieil enregistrement de bioindicateurs disponible pour le moment à Naachtun. Seul le sondage M2S10 a livré des assemblages phytolithiques de cette période. Il est alors difficile de discuter de l'étendue de cette ouverture au sein du *bajo* sur la base de cet unique échantillonnage. Il est, toutefois, possible de raisonner à partir des niveaux sédimentaires postérieurs.

En effet, le passage de l'ensemble sédimentaire M2E3 à M2E2 des sondages M2S10 et M2S1 (Fig 7.1) semble synchrone, le sommet de l'ensemble M2E3 étant calibré à 1615-1303 BCE (M2S10) et 1605-1429 BCE (M2S1) (Fig 5.2). Sur le sondage M2S10, les premières formations herbacées observées en M2E3, soit avant 1600 BCE, sont maintenues dans les échantillons basaux situés à la base de l'ensemble M2E2. Sur le sondage M2S1, les plus anciens

échantillons de phytolithes disponibles correspondent aux niveaux basaux de M2E2. Les assemblages ont été interprétés comme des écosystèmes climatiques de *bajo*, peu perturbés, de type *tintal*, *sival* ou encore *chechemal* (Fig 7.2). La déconnection spatiale et sédimentaire du sondage M1S2c, ainsi que l'absence de niveau Archaïque ou Préclassique ancien ne permet pas d'effectuer ce type de raisonnement. Sur la base de ces résultats, il semble plus raisonnable de considérer l'ouverture de la végétation en M2S10 comme un phénomène local au sein du *bajo*.

2. Interpréter cette ouverture de l'environnement végétal à Naachtun

i) L'opposition Homme-Climat dans les basses-terres centrales

Dans la région du Petén, ou plus largement des basses-terres centrales, l'ouverture précoce d'un milieu forestier peut être interprétée au regard de deux principales hypothèses invoquant des origines climatique et/ou anthropique (Islebe et al., 1996 ; Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2007). La première considère que les occupations humaines à la période Archaïque ou Préclassique ancien sont encore trop éparées pour qu'elles puissent être enregistrées par des bioindicateurs (Mueller et al., 2009 ; Nooren et al., 2018). Elle propose donc que l'apparition de formations végétales ouvertes, en fonction de leur composante herbacée, soit liée à des changements de régimes climatiques plus secs (Leyden, 2002 ; Wahl et al., 2013 ; 2014 ; Torrescano-Valle et Islebe, 2015). L'hypothèse anthropique prend le contre-pied de ces conceptions et envisage que les premières sociétés mayas ont eu un impact non-négligeable sur les paysages forestiers des basses-terres au moment de leurs installations (Pohl et al., 1996 ; Galop et al., 2004 ; Wahl et al., 2007 ; 2014).

a). Arguments pour une origine climatique d'un déboisement

Les travaux paléoclimatiques menés sur l'Amérique centrale, et plus particulièrement, sur les basses-terres de la péninsule du Yucatán, ont montré que la seconde partie de l'Holocène correspondait à un changement climatique important. A partir de 2500-2000 BCE, le climat est devenu plus sec à l'échelle des basses-terres, en raison d'un déplacement vers le sud de l'ITCZ, déplacement dû à une modification de la précession orbitale (Haug et al., 2001 ; Wahl et al., 2014). Wahl et al. (2014) proposent, d'ailleurs, que cette entrée dans l'Holocène terminal marque un changement dans le moteur principal du climat yucatèque, passant d'un contrôle Atlantique à une variabilité régionale contrôlée par les interactions océan-atmosphère Atlantique et Pacifique où l'ENSO aurait une influence accrue. Ce type de régime climatique se serait traduit par la mise en place d'une variabilité plus prononcée sur la péninsule du Yucatán, caractérisée par des températures plus chaudes à la saison sèche, entraînant un stress d'évaporation et une diminution de la disponibilité annuelle de l'humidité (Wahl et al., 2016).

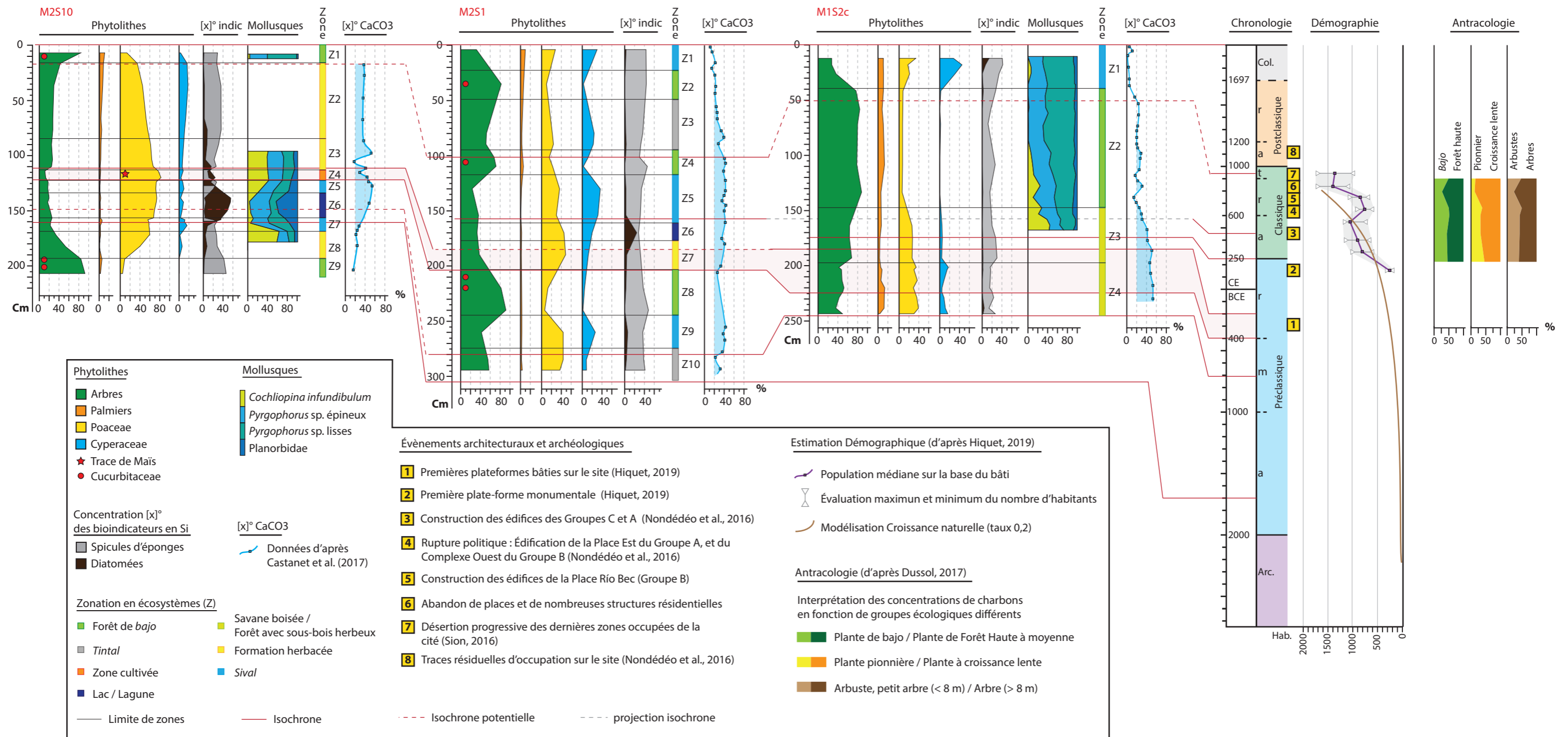


Figure 7.2 – Figure de synthèse récapitulant des connaissances nécessaires à une reconstitution des paléoenvironnements et des interactions société environnements sur le site de Naachtun au cours des 3500 dernières années.

Les premières traces de réduction des zones forestières tropicales dans le Petén sont très précoces et précèdent les premières traces anthropiques de plusieurs siècles, comme c'est le cas dans le lac Petén-Itza (Islebe et al., 1996 ; Mueller et al., 2009 – Fig 7.4). L'ouverture des écosystèmes environnants y est indiquée par une augmentation des pollens de Poaceae, de ligneux de petits tailles et typiques des savanes et également de *Quercus sp.* et de *Pinus sp.* lointains, que la canopée ne filtre plus, au détriment des taxons tropicaux (Islebe et al., 1996). D'un point de vue géomorphologique, c'est la diminution de la concentration en matière organique et/ou l'augmentation d'apports détritiques qui peuvent être interprétées comme indicateur d'un déboisement. Toutefois, la grande taille du lac Petén-Itza modère l'enregistrement des variations climatiques (Fig 7.4) et a tendance à lisser les courbes de proxy (Curtis et al., 1998). Les mêmes observations ont pu être réalisées sur différents plans d'eau des basses-terres à proximité du lac Petén-Itza (Leyden, 1987 ; 2002 ; Walsh et al., 2014 ; Wahl et al., 2016).

Ce diachronisme marqué entre l'apparition précoce de perturbations des écosystèmes forestiers par des associations végétales mésiques et la présence plus tardive de cultigènes sur divers sites des basses-terres (Fig 7.4) a entraîné certains chercheurs à considérer le climat comme premier moteur de l'ouverture des écosystèmes (Leyden, 2002 ; Carrillo-Bastos et al., 2010 ; Torrescano-Valle et Islebe, 2015). Toutefois, ces observations ne sont pas toujours vérifiées par les données isotopiques et de nombreux contre-exemples de synchronie culture-déboisement existent.

b). Arguments en faveur d'un déboisement anthropique

Dans le lac Salpetén, localisé à une centaine de kilomètres au sud de Naachtun (Fig 7.3), Rosenmeier et al. (2002) proposent que le déboisement initial et l'appauvrissement des sols ne soient pas être directement attribués aux établissements humains pionniers en raison de l'absence d'indices archéologiques. Cela ne permet pas de lier de façon linéaire le développement de la population et la réaction du bassin versant suite à la dégradation de la végétation. En effet, les premières traces archéologiques d'agriculture dans les basses-terres apparaissent, en général, plus tard au Préclassique ancien ou moyen (Fig 7.4).

Deux conjectures sont alors possibles. Soit comme le suggèrent Rosenmeier et al. (2002), les premières occupations ne sont pas enregistrées dans les archives fossiles et les perturbations des écosystèmes en sont tout de même la réponse. Soit l'assèchement du climat, attesté à l'Holocène terminal, a provoqué une ouverture précoce des environnements végétaux favorisant l'installation des premiers humains qui ont par la suite amplifié le processus. Il y aurait alors une combinaison à la fois des facteurs climatiques externes et des processus anthropiques intervenant à l'échelle locale. Il est, en effet, possible de concevoir qu'un épisode d'ouverture limitée de la végétation, contrôlé par le climat mais non-discernable avec nos données, ait favorisé l'installation de populations mayas en facilitant le travail de défrichage pour développer l'agriculture.



Figure 7.3 – Localisation des zones étudiées et citées dans ce chapitre, réparties entre sites archéologiques et zone de prélèvements paléoenvironnementaux.

Cependant, la diminution de la forêt en réponse à un assèchement régional pré-anthropique, débutant à 2000 BCE, est aujourd'hui peu compatible avec les données géochimiques et paléoenvironnementales. Le $\delta^{18}\text{O}$ du lac Salpetén diminue graduellement à partir de 1500 BCE suggérant des niveaux d'eau assez élevés ou une augmentation des précipitations (Rosenmeier et al., 2002 ; 2016 – Fig 7.4), au moment même où l'augmentation des concentrations en Ca par rapport au Ti des sédiments du lac Petén-Itza indiquent un maximum de sécheresse (Mueller et al., 2009). La perception de phases sèches dans la région des basses-terres semble diachronique (Fig 7.4). En effet, elles sont enregistrées vers 1000 BCE au lac Puerto Arturo (Wahl et al., 2013), vers 1200 BCE au Belize sur les stalagmites de Macal Chasm (Webster et al., 2007) ou avant 1500 BCE au lac Yaloch (Wahl et al., 2013). Cette diachronie se traduit également par un décalage dans l'enregistrement régional des perturbations forestières. A l'échelle des basses-terres centrales, les perturbations de la forêt tropicale et l'arrivée de taxons végétaux héliophiles et herbacés s'étalent entre 2500 BCE et 1000 BCE (Fig 7.4). Il semble difficile d'envisager une telle variation de réponses environnementales sur des périmètres aussi restreints.

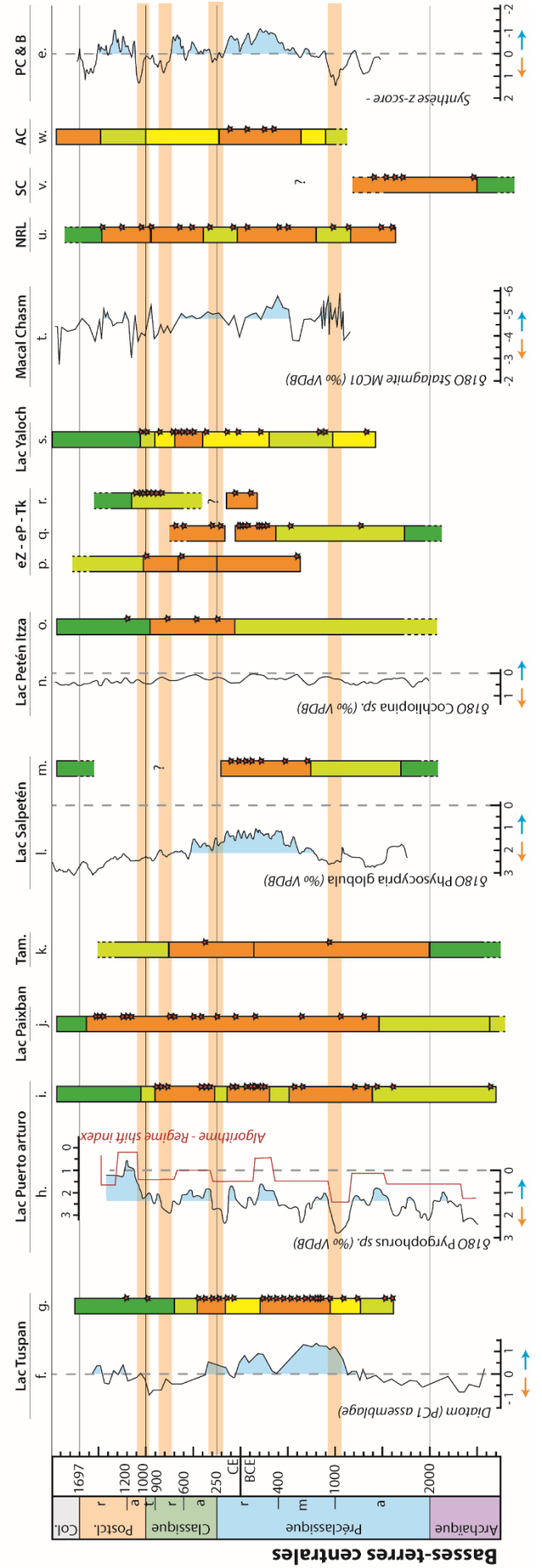
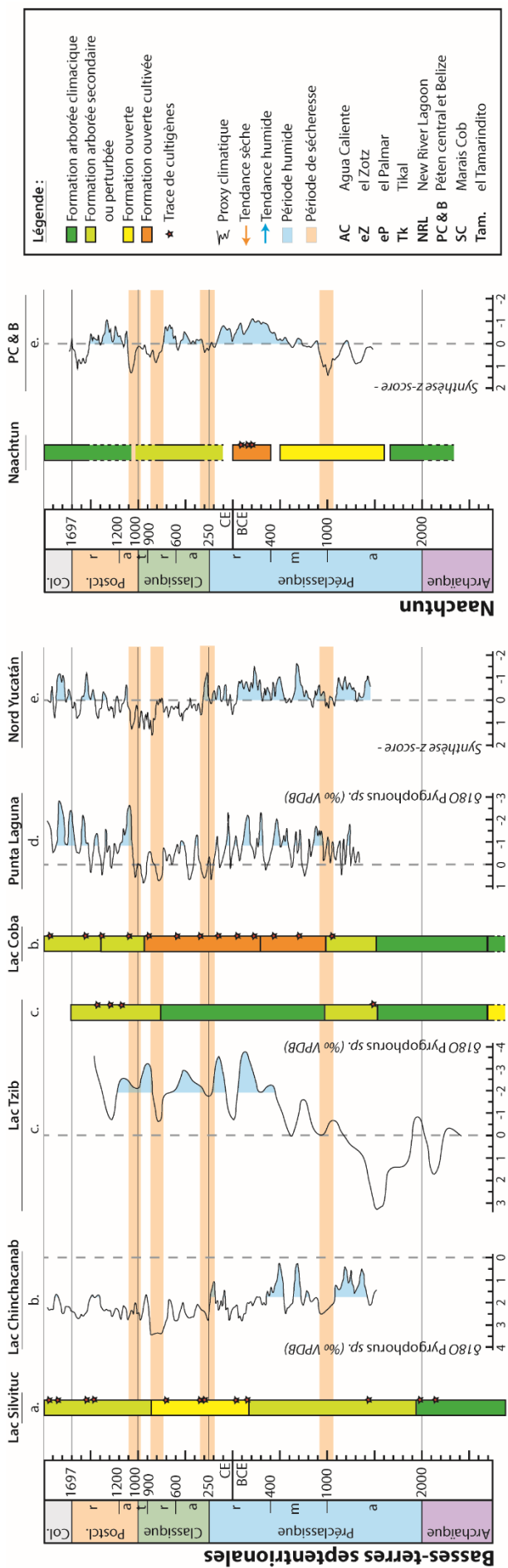


Figure 7.4 – Présentation et corrélation des travaux paléoenvironnementaux menés dans les basses-terres maya en comparaison avec les données paléoenvironnementales de Naachtun. Référence : a. Torrescano-Valle et Islebe, 2015 ; b. Curtis et al., 1996 ; c. Carrillo-Basto et al., 2010 ; d. Medina-Elizalde et Rohling, 2012 ; e. Douglas et al., 2016 ; f. Nooren et al., 2018 ; g. Galop et al., 2004 ; Carozza et al., 2007 ; h. Wahl et al., 2014 ; i. Wahl et al., 2007 ; j. Wahl et al., 2016 ; k. Dunning et al., 1998 ; l. Rosenmeier et al., 2000 ; 2016 ; m. Leyden, 2002 ; n. Curtis et al., 1998 ; o. Islebe et al., 1996 ; p. Beach et al., 2015 ; q. Luzzader-Beach et al., 2017 ; r. Dunning et al., 2015 ; s. Wahl et al., 2013 ; t. Webster et al., 2007 ; u. Rushton et al., 2012 ; v. Pohl et al., 1996 ; w. Walsh et al., 2014

Les traces d'agriculture très précoces dans les basses-terres mayas permettent également de douter d'une origine climatique des perturbations écologiques (Fig 7.4). Au lac Puerto Arturo, les premiers pollens de maïs ont été trouvés dans des sédiments datés à 2600 BCE (Wahl et al., 2007). Dans les sédiments des marais Cob et Cobweb au nord du Belize, des pollens de maïs ont été respectivement datés à 2400 et 2500 BCE alors que des grains de pollens attribués au manioc ont également été identifiés pour la période Archaique (Pohl et al., 1996). Dans les archives sédimentaires du lac Silvituc dans le Campeche (Mexique), Torrescano-Valle et Islebe (2015) identifient des pollens de maïs dès 1900 BCE, synchrones aux traces de perturbations des forêts tropicales. Enfin, à partir de 1500 BCE, la plupart des sondages étudiés dans les basses-terres centrales (Fig 7.4) témoignent de traces d'agriculture. Pour exemple, au New River Lagoon (Fig 7.3), des pollens de courges, de piments, de maïs sont enregistrés dans des sédiments à 1650 BCE (Rushton et al., 2012). Cette présence précoce de cultigènes à différents endroits des basses-terres centrales peut être considérée comme une signature écologique des pratiques préhispaniques d'utilisation des terres. Aujourd'hui, il est plus probable que les changements environnementaux de cette période Archaique soient liés à l'action humaine.

ii). Indices pour une occupation précoce à Naachtun

Le défrichement d'une portion du *bajo* semble être un évènement géographiquement restreint pour répondre à un évènement climatique régional. De plus, les variations des bioindicateurs hydrologiques, plus sensibles aux variations climatiques ne semblent pas pouvoir expliquer ce changement environnemental. En effet, des variations aussi importantes sont enregistrées sur d'autres niveaux sédimentaires de M2S10 (Fig 7.2) et ne correspondent pas à des modifications dans l'interprétation des écosystèmes.

Cette ouverture partielle de la végétation de *bajo* pourrait donc plutôt avoir été provoquée par l'établissement pionnier, dès le Préclassique ancien, voire l'Archaique, d'une population humaine sur le territoire de Naachtun. Il est, d'ailleurs, approprié de considérer qu'il s'agit d'une présence agricole dans la zone humide. La présence de la culture du maïs, dès la période Archaique, à Puerto Arturo, une trentaine de kilomètres à l'ouest du site (Wahl et al., 2007), apporte un premier argument à cette hypothèse. En effet, le pollen de maïs se disperse peu (Raynor et al., 1972). Sa présence, dans une zone humide, indique que cette

céréale est cultivée à proximité ou sur les marges de la zone humide. Il est possible que cette ouverture du milieu à Naachtun soit héritée d'une stratégie d'occupation agricole des plaines d'inondation du *bajo* lors des saisons sèches. Les pourcentages moyens de spicules d'éponges (20-25%) et la rareté des diatomées (Fig 7.2) laissent, en effet, penser que cette ouverture du milieu s'est déroulée dans une zone du *bajo* saisonnièrement exondée.

Toutefois, nous nous trouvons dans le cas de figure proposé par Rosenmeier et al. (2002) où les traces directes des premiers établissements humains, supposés agricoles, ne sont pas démontrées, pour ne pas dire absentes, dans nos assemblages de bioindicateurs. Les phytolithes de Cucurbitaceae, trouvés à la base du sondage M2S10 (Fig 7.2), auraient pu être interprétés comme des indices de culture dans le *bajo*. Mais, leur disparition dans les niveaux ouverts sus-jacents et les résultats du référentiel moderne ayant montré que les phytolithes de cultigènes sont mal enregistrés dans les systèmes forestiers ou de jachères, confortent l'hypothèse de considérer ces assemblages comme hérités d'une forêt de *bajo* avec des populations sauvages de Cucurbitaceae.

L'absence de trace de maïs va aussi à l'encontre de cette interprétation. Le court transport des grains de pollen de maïs explique, dans certaines études, la possibilité de trouver des zones végétales perturbées ou ouvertes sans trace de cultigènes. Ce phénomène est amplifié dans ce type de zone humide où les modes de transport des sédiments sont dominés par la décantation et par le dépôt in-situ (Madella et Lancelotti, 2012). Cela implique que les phytolithes de maïs ne seront conservés qu'à l'endroit même où ils sont cultivés, réduisant considérablement leur probabilité d'occurrence sur des prélèvements ponctuels. La récolte des cultigènes peut également diminuer les dépôts de phytolithes diagnostiques contenus dans les fruits et graines, comme c'est le cas du maïs. Une autre explication peut provenir de notre image surévaluée de la présence du maïs dans les cultures pionnières des premières populations des basses-terres. Les travaux menés sur les régimes alimentaires des Mayas bélizéens au Préclassique ont montré que le maïs ne constituait qu'environ un tiers de l'alimentation de ces populations et qu'une consommation plus importante de cette céréale n'apparaît qu'à partir de la période Classique (White et al., 1993 ; Van der Merwe et al., 2002). Il est concevable que les premiers modèles agraires soient plus mixtes et fassent appel à des espèces sauvages ou alors à des cultigènes qui produisent peu ou pas de phytolithes, comme la tomate, le piment ou encore le manioc (Pohl et al., 1996 ; Rushton et al., 2012), diminuant ainsi la possibilité d'identifier leur trace dans les sédiments.

Enfin les données géochimiques de Naachtun, et notamment le rapport C:N peut nous renseigner sur la provenance de la matière organique (Fig 7.5). Il existe une large plage de valeurs existantes pour le rapport C:N, en fonction des plantes et des environnements étudiés (Meyers et Teranes, 2001). Dans le Petén, les valeurs inférieures à 10 sont produites lorsque les algues lacustres sont la principale source de matière organique, les valeurs supérieures à 15 indiquant plutôt l'apport de plantes terrestres dans un environnement peu profond (Wahl et al., 2013).

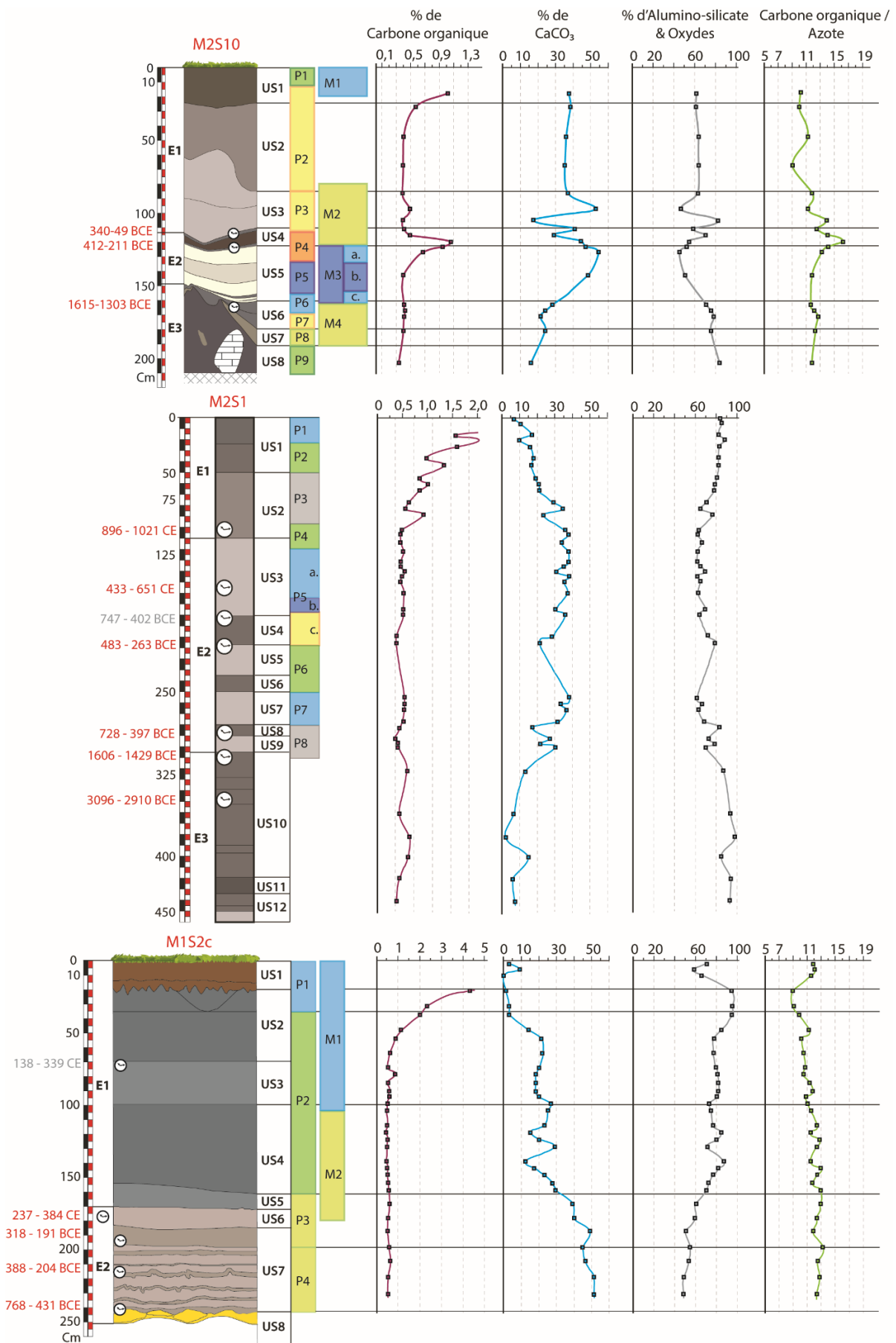


Figure 7.5 – Présentation de données géochimiques (% C_{org}, % de CaCO₃, % d'alumino-silicate et Oxyde, rapport C/N) obtenues sur les sondages sédimentaires de Naachtun (d'après Castanet, 2017).

Ainsi les faibles variations de valeurs du rapport C:N à Naachtun pour cette période, comprises entre 11 et 13, sont difficilement interprétables comme une réponse environnementale de la végétation (Wahl et al., 2013). En revanche, ces valeurs sont cohérentes avec celles des milieux modernes de *sival* et de *bajo* à Naachtun (*communication personnelle, C. Hatté*), et confirment l'observation faite à partir des spicules d'éponges et des diatomées.

Aux vues de ces différents éléments, il est possible de considérer que cette ouverture ponctuelle du *bajo* soit la trace et la conséquence d'une occupation humaine précoce et spatialement limitée sur le territoire de Naachtun (Fig 7.6). Les connaissances régionales disponibles, supposent que cette modification de l'environnement répond à un besoin agricole, même si, celui-ci n'est pas fondamentalement démontré par les bioindicateurs et que les traces archéologiques d'une occupation du site sont inexistantes. Ces incertitudes peuvent provenir de la modicité des surfaces sondées au regard du territoire de Naachtun mais aussi, pour l'archéologie, de la prédominance de matériaux périssables dans les constructions.

iii). Réflexion démographique sur des populations Archaiques à Naachtun

Les travaux des archéologues à Naachtun n'ont pas, en effet, permis de mettre à jour des structures datant des périodes Archaique ou Préclassique ancien qui correspondraient à ces premiers indices de perturbations des écosystèmes. Dans son travail de thèse, Hiquet (2019) propose une réflexion démographique basée sur l'évolution des structures archéologiques et la notion de croissance naturelle (Fig7.3).

Sur la base des densités de structures archéologiques par phase de datations et des estimations d'occupation de ces structures, il a proposé une évolution de la population de Naachtun au cours de son occupation archéologique (150-950 CE). Ses résultats, indiquant une population terminale et des estimations temporellement bornées, permettent de modéliser des courbes de croissance naturelle avec des taux prédéfinis, et ainsi, d'estimer une potentielle population à une période donnée où les traces archéologiques ne sont pas disponibles. Si cette méthode ne traduit pas une réalité archéologique, elle permet de fournir un cadre démographique de réflexion sur les tendances d'occupation.

L'application d'un taux moyen de croissance naturelle à 0,2%, proposé par Hiquet (2019), permet d'obtenir une courbe d'évolution de la démographie qui remonte de l'apogée démographique du site (2500 habitants estimés à 800 CE) jusqu'au Préclassique à 1600 CE (Fig 7.2). Cette première modélisation indique la présence d'une vingtaine de personnes sur le site de Naachtun au Préclassique ancien. Hiquet (2019) propose également d'appliquer une croissance annuelle supérieure, de 0,3 %, à partir du pic de population de la période Classique récent (600 – 800 CE) et une croissance moindre de 0,1% avant 600 CE, en partant toujours du nombre d'habitants maximum de Naachtun pour 800 CE. Cette nouvelle

modélisation indique une population de 152 habitants vers 1600 BCE, soit le nombre minimum d'habitants estimé à 150CE par le comptage des structures (Hiquet, 2019).

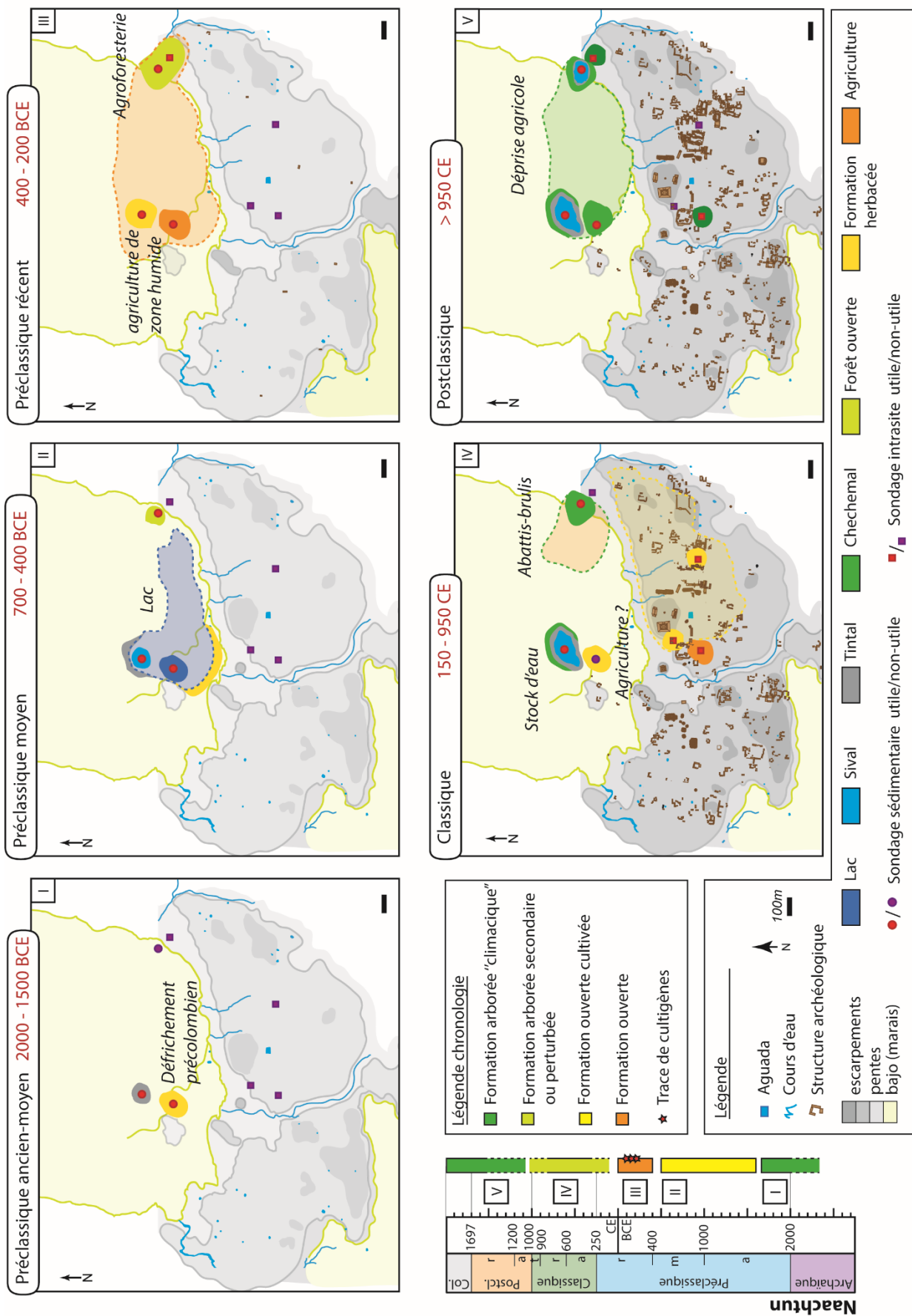


Figure 7.6 – Proposition de reconstitution des paléoenvironnements de Naachtun sur 5 périodes principales de la chronologie Maya. Comparaison avec la séquence phytolithique résumée.

Ce travail ne constitue pas une preuve supplémentaire de la présence de populations mayas à Naachtun au Préclassique ancien. En revanche, elle nous permet de conforter notre raisonnement d'une occupation précoce de Naachtun, de manière synchrone aux autres sites de la région, et également, du processus de perturbation écologique observé dans le *bajo*.

II. Un lac au Préclassique à Naachtun ? (750 – 400 BCE)

1. Indice de la présence d'un plan d'eau de grande taille dans le *bajo*

i). Un signalement carbonaté sédimentaire et géochimique

Les trois sondages sédimentaires étudiés présentent des ensembles sédimentaires interprétés comme des dépôts carbonatés (voir Fig 5.2). Cette interprétation repose, en partie, sur des données géochimiques de pourcentages de carbonates (Castanet, 2017). L'ensemble M2E2 des sondages M2S10 et M2S1 a livré des échantillons avec des taux de CaCO₃ compris entre 25 et 50% quand les taux modernes ne dépassent pas 10% dans le *bajo*. Les dates disponibles pour les deux sondages témoignent d'une certaine synchronicité puisque ces dépôts carbonatés recouvrent des dépôts argileux dont les sommets, ont respectivement, été datés à 1615-1303 BCE et 1606-1429 BCE. La première phase de diminution des valeurs de CaCO₃ est également synchrone puisque les niveaux qui scellent ces dépôts sont datés à 412-211 BCE et 483-263 BCE (Fig 7.5). On remarque cependant une seconde phase carbonatée pour les deux sondages mais l'absence de datation pour M2S10 ne permet pas de les corrélérer temporellement. L'ensemble sédimentaire, situé à la base du sondage M2S1, présente également de forts pourcentages de carbonate de calcium, autour de 40%, alors qu'une tendance à la diminution est observée à partir de 318-191 BCE. La variation des carbonates présente également un second plateau dans l'ensemble sédimentaire M1E1 qui, n'est pas daté (Fig 7.5).

Cette première phase carbonatée et approximativement datée de la période Préclassique semble être enregistrée à travers l'ensemble du *bajo*. Par ailleurs, sur le transect M2, la corrélation altimétrique des extrémités sud-ouest et nord-ouest de l'ensemble sédimentaire carbonaté M2E2 n'enregistre qu'un écart de 10 cm sur une longueur d'1 km.

L'ensemble de ces résultats a conduit Castanet et al. (2017) à interpréter cette couche carbonatée comme l'héritage d'un paléolac centré en M2S1 dont l'extension recouvrait la majeure partie de la zone ouest et sud du *bajo* de Naachtun.

ii). Utilisation des bioindicateurs

Les données obtenues sur les assemblages de bioindicateurs en M2S10 ont, également, été interprétées comme le témoignage d'un ancien plan d'eau de grande envergure à Naachtun. Sur l'ensemble M2E2 de ce sondage, les assemblages de phytolithes sont interprétés comme une formation végétale particulièrement ouverte (Fig 7.2).

Au début de cette phase carbonatée, les valeurs moyennes de phytolithes de Cyperaceae (15 à 20%) et l'augmentation graduelle de diatomées suggèrent le développement d'une zone humide pérenne de type *sival*. Cette interprétation est soutenue par des assemblages malacologiques dominés par les coquilles de *Pyrgophorus* sp., semblables à ceux récoltés dans les environnements modernes de *sival* échantillonnés (Fig 7.2).

La phase suivante (S10-Z6, Fig 7.2) est caractérisée par une diminution des Cyperaceae aquatique (< 10%), une quasi-disparition des spicules d'éponges et une domination importante des frustules de diatomées. Cet assemblage avait été interprété comme une zone humide pérenne et plus profonde que les *sival*. Les assemblages malacologiques sont marqués par la brusque augmentation des formes de Planorbidae, un assemblage semblable à ceux trouvés dans le lac Laguna de Coco au Belize (Bradbury et al., 1990).

Enfin, cette passée tuffacée se termine par une phase où les taux de diatomées diminuent et ceux de spicules d'éponges augmentent de nouveau, mais, sans retour notable des phytolithes de Cyperaceae. Ce sont les assemblages malacologiques, dominés une nouvelle fois par les *Pyrgophorus* sp. et la baisse des Planorbidae, qui permettent de conclure au retour d'une zone d'eau pérenne de plus petite dimension de type *sival*.

En revanche, les assemblages de bioindicateurs siliceux issus des archives sédimentaires du sondage M2S1 racontent une tout autre histoire pour cette première phase carbonatée. Les environnements y sont relativement plus forestiers, à l'exception d'un échantillon, interprété comme *sival*, où les phytolithes de Cyperaceae et de Poaceae prennent une part importante de l'assemblage. Les spicules d'éponges atteignent des taux moyens autour de 30% alors que les diatomées sont relativement rares (Fig 7.2). En l'absence d'autres bioindicateurs, cet environnement est interprété comme une zone forestière de *bajo* qui devait être, saisonnièrement, exondée au cours du Préclassique, à l'exception d'une période plus humide pendant laquelle une zone d'eau plus pérenne, comparable à un *sival* a perduré.

Les données partielles de M1S2c sur la première phase carbonatée ne permettent pas non plus de conclure à la présence d'un lac. Les assemblages de phytolithes ne montrent pas d'indice d'environnements humides sous la forme de Cyperaceae et les taux de spicules et de diatomées sont, respectivement, inférieurs à ceux observés pour M2S1. Les mollusques sont mal référencés sur ce niveau (échantillonnage composite avec un volume seuil de prélèvement non atteint) mais semblent montrer des concentrations relativement faibles.

Les écosystèmes de M1S2c correspondraient alors à des environnements exondés une bonne partie de l'année.

Si les indicateurs géochimiques et sédimentaires montraient une réponse homogène à un événement environnemental par des phases carbonatées synchrones sur les sondages sédimentaires, les enregistrements de bioindicateurs sont, toutefois, plus nuancés. Si la présence d'un grand plan d'eau de type lac semble attestée pour M2S10, ce n'est pas le cas pour M2S1 et M1S2c. Une discussion sur ce potentiel environnement lacustre et sa temporalité est proposée ci-après.

iii) Interprétation alternative des indicateurs

a). Calibration des données de CaCO₃ et de C:N

L'ensemble des données a convergé, dans un premier temps, vers l'hypothèse de la présence d'un grand plan d'eau dans le *bajo* à Naachtun au cours du Préclassique. Toutefois, aux vues des travaux régionaux, il est possible de nuancer cette interprétation voire d'en prendre le contrepied.

La teneur en carbonate des lacs dans les basses-terres semble provenir de deux sources : par lavement des sols environnants ou par une production biogénique autochtone (Wahl et al, 2013). Dans le premier cas, le carbonate est transporté sous forme dissoute dans un système de bassin fermé et va précipiter par évaporation. Dans le second cas, la précipitation de carbonates biogènes peut être liée à une production algale provoquée par des changements environnementaux (pH, nutriment, turbidité, etc.).

Dans la région lacustre de Petén-Itza, Rosenmeier et al., (2002) supposent que les déboisements provoqués par les Mayasmayas soient à l'origine de l'appauvrissement des sols carbonatés en favorisant leur érosion. Les sédiments ainsi érodés transportés vers les zones de sédimentation telles que les environnements lacustres. Mueller et al., (2009) suggèrent également que les dépôts carbonatés du lac Petén-Itza datés de 1500 BCE trouvent leur origine dans la mise en place de conditions plus sèches, en lien avec une déforestation. Toutefois, dans ce même lac, les taux de carbonates diminuent drastiquement pendant les périodes de sécheresse à la fin du Classique (Curtis et al., 1998), laissant penser que d'autres variables de contrôle que le climat jouent un rôle dans la précipitation des carbonates.

Le Lac Laguna Yaloch (Fig 7.3) est de taille plus réduite que Petén-Itza et présente une précipitation de carbonates importante, datée du Classique terminal. Si cette datation concerne peu notre période Préclassique, les données géochimiques sur les taux de CaCO₃ et les valeurs C:N nous permettent de mieux comprendre le mode de dépôt de ces carbonates pendant un épisode de sécheresse régionalement enregistré (Douglas et al., 2016). D'ailleurs, les dépôts de ce plan d'eau, enregistrent au cours de son histoire, des

valeurs de CaCo₃ qui oscillent majoritairement autour de 10%, à l'exception du pic cité qui présente des valeurs autour de 30 à 50% (Wahl et al., 2013). Les auteurs de ce travail considèrent, malgré l'absence de traces de dessiccation du lac à cette période, que les données climatiques régionales sont suffisantes pour suggérer un lien entre la diminution des apports hydrologiques et l'augmentation du taux des carbonates. Il réfute par ailleurs l'hypothèse d'une précipitation de carbonates biogéniques en raison de la stabilité des valeurs de C:N au cours de cet épisode. En effet, une précipitation massive de carbonates biogènes, d'origine algale, aurait certainement diminué les valeurs du rapport C:N (Meyers et Teranes, 2001 ; Wahl et al., 2013)

En effet, les données climatiques régionales des basses-terres centrales (Fig 7.4) montrent une phase relativement plus sèche au début du Préclassique moyen (1200 BCE, 1000 BCE – Douglas et al., 2016). Dans le cas de Naachtun, les assemblages de phytolithes du sondage M2S1, au cours de la phase carbonatée sont plutôt caractéristiques de milieux inondés saisonnièrement, ce qui ne correspond pas à l'hypothèse d'une période initiale de sécheresse. Enfin, la phase carbonatée de Naachtun s'échelonne sur une période de temps bien plus étendue que les phases de sécheresse enregistrées régionalement. Il est probable que d'autres paramètres de contrôle aient joué un rôle.

On peut, notamment, penser au déboisement observé précocement dans le *bajo* qui s'est probablement amplifié au cours du Préclassique à Naachtun. Comme l'indiquent Rosenmeier et al. (2002), le défrichement de terres-hautes aurait pu permettre l'apport de carbonates mais aussi de matière organique venue des zones de versants. Cet apport sédimentaire aurait pu jouer un rôle dans l'enregistrement des valeurs de C:N (Meyers et Teranes, 2001). Dans l'état actuel des données, la mise en place des sédiments carbonatés ne semble pas correspondre à une augmentation du rapport C:N (Fig 7.5). Par ailleurs, le maintien de faibles valeurs de C:N n'est donc pas incompatible avec la présence d'un plan d'eau important au Préclassique.

b). Calibration sur la base des diatomées

Un des arguments en faveur de la présence d'une phase lacustre dans le *bajo* de Naachtun, au cours du Préclassique, est la prédominance des diatomées au sein des assemblages de bioindicateurs dans les échantillons tufacés de M2S10 (Fig 7.2). Cette interprétation s'appuie sur le référentiel moderne de Naachtun montrant que les concentrations de diatomées sont plus exprimées dans les environnements aquatiques pérennes.

Les travaux de Nooren et al. (2018) sur les assemblages de diatomées du lac Tuspan permettent un contrôle de ces hypothèses. Même si ce plan d'eau est beaucoup plus étendu que ceux présents actuellement à Naachtun, l'évolution des concentrations de diatomées face aux variations hydrologiques peut nous servir à nuancer nos interprétations. Le long de cet enregistrement sédimentaire, les concentrations de diatomées ont amplement varié

entre des phases importantes et des phases basses. Cette étude démontre, que les phases de concentrations élevées en diatomées ne sont pas corrélées aux périodes de hauts niveaux du lac. Les phases les plus humides sont, en revanche, corrélées à l'apparition d'espèces diagnostiques de diatomées. Cette approche taxonomique n'ayant pas été menée avec les diatomées à Naachtun, il est difficile d'en discuter.

Ainsi, à Naachtun, les fortes proportions de diatomées pourraient provenir de processus autres que les seules variations hydrologiques. Comme déjà vu, l'arrivée massive de nutriments, lors des phases d'érosion ou de lessivage des sols escarpés, pourrait favoriser l'apparition d'une production primaire au sein du lac. Toutefois, ces hypothèses ne sont pas contradictoires avec la présence d'une masse d'eau importante, toujours soutenue par les assemblages malacologiques calibrés sur les environnements modernes.

2. Discussion sur l'extension temporelle et spatiale du lac de Naachtun

i). Corrélation temporelle des résultats géochimiques

L'ensemble sédimentaire M2E2 et la première phase carbonatée sont datés par les unités sédimentaires sous et sus-jacentes entre 1600 et 400 BCE (Fig 7.2). Cette extension temporelle d'une phase lacustre ne semble pas corrélée avec les variations climatiques régionales discutées auparavant. Des phases de sécheresses ont en effet été identifiées aux alentours à 1200 et 1000 BCE (Fig 7.4 - Douglas et al., 2016).

La synchronicité des enregistrements sédimentaires de l'ensemble M2E2 et M1E2 est identifiée avec les enregistrements géochimiques des concentrations de carbonates de calcium (Fig 7.2). Cela est, au moins, vérifié avec la terminaison de ces phases géochimiques qui est synchrone, aux alentours 400-200 BCE et caractérisée par une diminution des taux de CaCO₃ (Fig 7.2). En revanche, la base de cette augmentation est mal comprise à l'échelle du *bajo*, notamment de par l'absence d'archives sédimentaires pour M1S2c. En M2S10 et M2S1, l'augmentation des carbonates débute, sur les niveaux supérieurs de l'ensemble M2E3, avant de présenter des valeurs importantes sur l'ensemble M2E2. Cela laisse penser qu'il y a continuité sédimentaire entre M2E3 et M2E2 et pourrait valider un apport de carbonates, provoqué par l'érosion des versants et non en lien, avec le comportement hydrologique de la zone humide.

En M2S10, la phase riche en diatomées et en Planorbidae, interprétée comme un environnement lacustre, correspond à la partie ascendante et le début du plateau de la courbe de CaCO₃ (Fig 7.2). Le début de la phase de plateau en M2S1 et le plateau de valeurs en M1S2c sont, respectivement, datés à 728-397 BCE et 768-431 BCE. Il est alors tentant de considérer que le début de la phase lacustre du *bajo* de Naachtun correspond à ces datations. Ces données laissent suggérer le développement d'une zone lacustre à Naachtun au cours du Préclassique moyen et qu'il ait commencé à diminuer au Préclassique récent.

La présence d'un lac à Naachtun au cours du Préclassique moyen est en accord partiel avec les données climatiques régionales pour cette période (Fig 7.4). Les études sur le lac Tuspan (Nooren et al., 2018) et le lac Salpetén (Rosenmeier et al., 2016) suggèrent des périodes plus humides avec, selon les indicateurs, soit des niveaux lacustres plus hauts soit des précipitations plus importantes. Toutefois, au Belize (Webster et al., 2007) et au lac Puerto Arturo (Wahl et al., 2014) à l'est de Naachtun, cette période humide semble décalée et survenir à la transition Préclassique moyen – Préclassique récent (Fig 7.4). C'est également ce que montrent les résultats paléoclimatiques régionaux des basses-terres septentrionales (Douglas et al., 2016). Cependant, la plupart de ces études reposent, principalement, sur l'interprétation paléoclimatique du $\delta^{18}O$. Or, cet indicateur d'humidité, peut également être interprété comme un témoignage des activités de déboisement, entraînant un ruissellement d'eaux souterraines légères en $\delta^{18}O$ (Rosenmeier et al., 2002). Toutefois, sur la base d'une analyse géospatiale des pollens de forêts tropicales, Carrillo-Bastos et al. (2012) confirment qu'une période plus humide a existé, au moins durant la transition Préclassique moyen-Préclassique récent (550 – 50 BCE).

ii). Position spatiale du lac de Naachtun au Préclassique moyen

Sur la base des sédiments et de la géochimie, Castanet et al. (2017) proposent une reconstitution d'un paléolac à Naachtun, centré sur M2S1 et qui occuperait la partie ouest et sud du *bajo*. Nous l'avons vu, les données des bioindicateurs modèrent, en partie, ces résultats. Une reconstitution de cette ancienne zone de lac sur la base des bioindicateurs est ici proposée.

Les assemblages de mollusques de la phase lacustre sont semblables aux assemblages modernes du lac Laguna de Cocos dont les dimensions, largeur et longueur, sont de l'ordre de plusieurs centaines de mètres, soit une centaine d'Hectares (Bradburry et al., 1990). Actuellement, les zones d'eau des *sival* de Naachtun sont limitées à une centaine de mètres de longueur, pour quelques dizaines de mètres en largeur (en moyenne 1Ha). Il semble donc logique d'imaginer au Préclassique moyen un plan d'eau relativement plus étendu dans le *bajo*, comparable à un lac Préclassique.

Le sondage M2S1 présente la phase carbonatée la plus profonde et la plus épaisse du transect M2. Cela indiquerait que le centre du bassin de sédimentation se trouvait dans la même position au cours du Préclassique qu'aujourd'hui. Sur cette période 700-400 BCE, les sédiments de M2S1 témoignent, plutôt, d'environnements de dépôt de type palustre avec, une période immergée par une nappe d'eau pérenne peu profonde, semblable à un *sival* moderne. Cette zone de *sival*, synchrone du dépôt lacustre de M2S10, pourrait correspondre à l'extension maximale du lac vers le nord du *bajo*. Au sud-ouest du *bajo*, en M1S2c, les bioindicateurs siliceux indiquent une zone où les inondations sont plutôt saisonnières et de durées comparables à celles observées dans les zones modernes de forêts de *bajo*. Cela implique une certaine distance par rapport à la zone d'eau pérenne, qui aujourd'hui,

correspondrait au moins à une centaine de mètres, reléguant ainsi, le paléolac vers la partie ouest du *bajo*.

Pour résumer, il semble qu'un plan d'eau de grande envergure ait occupé, au cours du Préclassique moyen (700 – 400 BCE), la partie ouest du *bajo* (Fig 7.6). Ce paléolac offrait une quantité d'eau importante (de l'ordre d'une centaine d'Hectares), ayant pu favoriser le maintien durable des occupations humaines pionnières relevées au Préclassique ancien. En plus d'assurer un accès à l'eau aux populations cette zone humide aurait pu offrir un nouvel espace pour un type d'agriculture déjà pratiqué à l'est (Pohl et al., 1996 ; Dunning et al., 2018).

III. Exploitation agricole du *bajo* au Préclassique récent (400 BCE – 150 CE)

1. Cultiver dans les *bajo* au Préclassique récent

i). Enregistrement des cultigènes à Naachtun

La première trace d'une occupation humaine de Naachtun supportée par les proxys physico-chimiques et les bioindicateurs, se trouve dans l'US4 du sondage M2S10 (S10-Z4 – Fig 7.2). Il s'agit d'un paléosol organique, fortement oxydé, caractérisé par un léger pic de carbone organique (+1%) et des valeurs de C:N qui atteignent 17 (Fig 7.2). Enfin, les données des bioindicateurs siliceux indiquent la présence d'eau pérenne sur ces niveaux.

On remarque ici des informations relativement contraires. Les valeurs C:N de cette phase sont importantes et ne correspondent pas aux environnements humides indiqués par les bioindicateurs. En effet, on le rappelle, les valeurs C:N des environnements humides du Petén sont généralement faibles, autour de 10 (Wahl et al., 2013). Les fortes valeurs de C:N à Naachtun indiquent donc l'apport de plantes vasculaires dans ces environnements humides (Meyers et Teranes, 2001). Les mêmes variations de valeurs sont observées dans le lac Yaloch à la transition Préclassique/ Classique. La culture importante de maïs, à proximité de la zone de prélèvement, révélée par la présence de nombreux grains de pollens, est corrélée à une augmentation du rapport C:N de 10 à 17 (Wahl et al., 2013). On a ici un premier indice pour discuter de la présence d'une agriculture à proximité de la zone humide.

Les assemblages de phytolithes de ce paléosol sont dominés par les Panicoïdeae et ils sont interprétés par l'indice D:P comme la phase la plus ouverte des sondages étudiés. Ce caractère ouvert et humide de la végétation est attesté par le retour de l'espèce *Cochliopina infundibulum*. Dans ce paléosol, les phytolithes de type Cross représentent plus de 15% des assemblages de phytolithes, contre en moyenne 6% dans les autres échantillons. C'est dans ce contexte qu'a été menée une étude morphométrique des phytolithes de type Cross pour démontrer la présence de maïs. Sur 8 échantillons testés pour les US de ce sondage, seuls les trois échantillons de ce paléosol ont présenté des morphotypes supérieurs à 21µm, attestant ainsi de la présence de la culture du maïs (Iriarte et al., 2003) à cette époque dans le *bajo* (Fig 7.2).

Ces résultats, sont la signature de pratiques agricoles au sein du *bajo* dans un contexte de plan d'eau pérenne. Si au premier abord, cela peut paraître défavorable à la culture de cultigènes peu adaptés à pousser dans un milieu inondé comme le maïs ou la courge, cette hypothèse est, en réalité, étayée par de nombreuses découvertes au sein des basses-terres mayas (Pohl, 1990 ; 1996 ; Dunning et al., 2019).

ii) Percevoir l'agriculture dans les *bajo*

a). Les traces géomorphologiques

Alors que l'occupation des marges de plan d'eau et de *bajo* par les villes mayas a longtemps été déconcertante pour les archéologues qui ont souvent considéré les *bajo* comme des milieux pauvres en ressources. Dunning et al. (2019) rapportent, qu'aujourd'hui, les *bajos* et les zones humides sont considérées comme des sources et des zones de stockage d'eau, des zones de chasse, de cueillette ou de récolte de bois et enfin des zones de développement agricole. En effet, depuis les années 1970, les preuves géomorphologiques se sont accumulées pour démontrer que les Mayas avaient développé des activités agricoles dans les zones humides des basses-terres centrales et plus particulièrement, dans les espaces de *bajo* ou bien les marges de plans d'eau pérennes.

En 1972, Siemens et Puleston publient des photos aériennes du sud du Campeche, présentant des buttes et des champs surélevés délimités par des canaux, dans une plaine alluviale à proximité du site archéologique El Tigre. Ils interprètent ces structures comme des aménagements préhistoriques pour une horticulture. Le même type de structure de buttes et champs surélevés et de canaux ont été mis à jour à plusieurs autres endroits dans les basses-terres centrales, notamment dans les vallées du nord du Belize sur plusieurs sites archéologiques (Pohl et al., 1996) ou au nord du Guatemala (Lemonnier, 2006). L'application des techniques LiDAR devrait améliorer l'identification de ce type de structure dans les *bajos* (Canuto et al., 2018 ; Beach et al., 2019). Les transects LiDAR réalisés sur les basses-centrales depuis une dizaine d'année ont ainsi permis de relever de nombreux systèmes de "mur de champs" (*field walls*) en pied de pente de bajo qui peuvent être reliés à des systèmes de fossés et de canaux du bajo (Beach et al., 2002 ; Dunning et al., 2019).

Ces ouvrages apportent de multiples avantages. Dans un premier temps, ils participent au drainage des zones humides, voire au stockage de l'eau dans des réservoirs naturels ou artificiels (Scarborough et al., 2012). Ces champs surélevés avaient la capacité de protéger les cultures d'inondations précoces, mais également pendant la saison humide, d'être inondés, capturant ainsi boue, nutriment et matière organique, assurant les besoins des cultures (Pohl et al., 1990 ; Lemonnier, 2006). Enfin, Siemens et Puleston (1972) suggèrent que les canaux étaient aussi utilisés comme voie de transport entre les cultures et protégeaient également les cultures des prédateurs.

Les plus anciens champs surélevés identifiés semblent être datés du Préclassique moyen au Belize (Pohl, 1990). Auparavant, les premières installations agricoles qui ont eu lieu sur les marges des *bajos* ne présentaient pas ces structures et devaient fonctionner sous la forme de phases d'agriculture en période sèche (Pohl et al., 1996). La conversion progressive des zones ouvertes de *bajo* en système de champs et canaux surélevés, mais également en terrasses sur les pentes (Chase et al., 2011), font partie d'une séquence de réponses humaines aux changements environnementaux au cours des siècles d'occupation (Kunen, 2000 ; Lemonnier, 2006 ; Dunning et al., 2019).

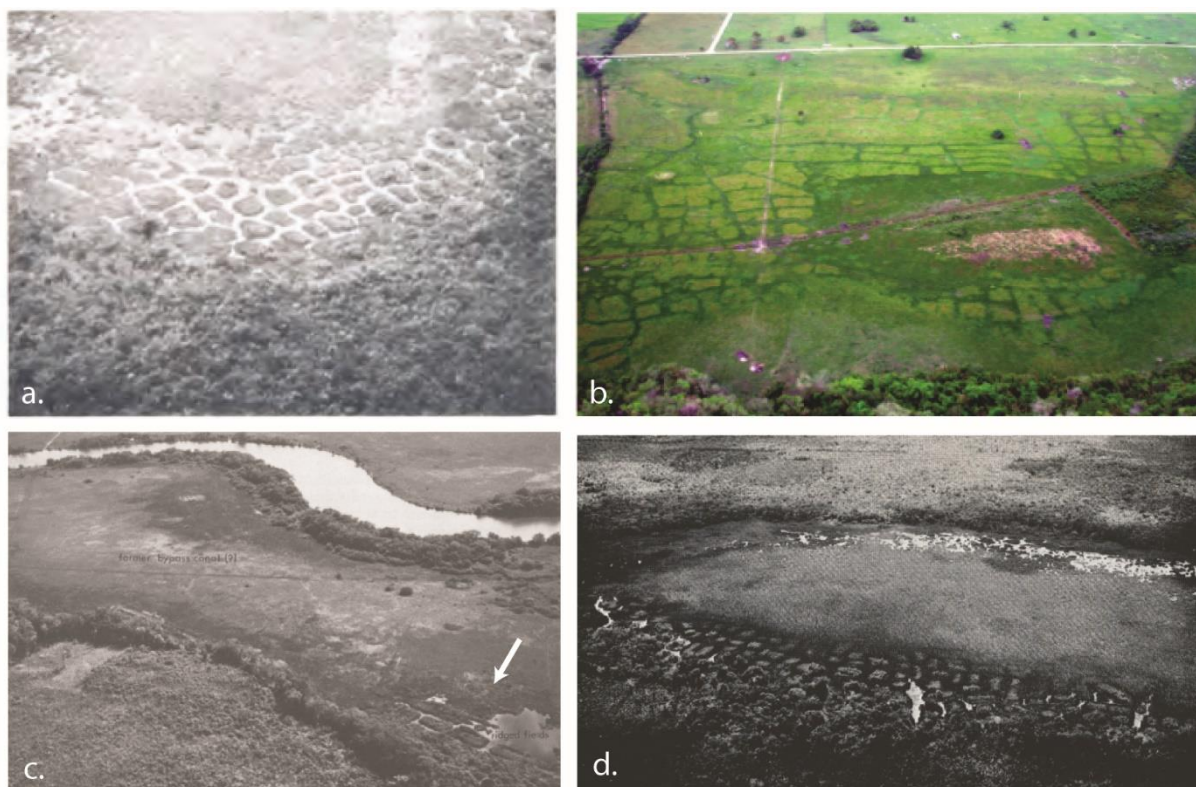


Figure 7.7 – Photographies aériennes de paysages hérités d'anciens champs surélevés en zone humide. a. Pulltrouser swamp , Belize (Turner II et Harrisson, 1981) ; b. Chan cahal site, Belize (Luzzadder-Beach et al., 2012) ; c. El Chilar, Campeche (Siemens et Puleston, 1978) ; d. Nohmul site, Belize (Puleston, 1977).

b). Les indices fournis par les bioindicateurs

La réflexion sur les modes de pratique agraire dans le *bajo* passe également par les types de cultigènes utilisés. On l'a vu au cours de l'étude du référentiel moderne des pratiques agricoles, le triptyque maïs-courges-haricot est loin d'être automatique (chapitre 4). Les cultigènes utilisés sont, en réalité, beaucoup plus diversifiés et leur utilisation répond à des contraintes calendaires, pédologiques, cadastrales ou encore de cycles de végétation. Cette observation ethnobotanique a été vérifiée dans d'autres zones géographiques des basses-terres (Lundell, 1933a ; Ford et Night, 2009) mais, elle a également été supposée pour les périodes préhispaniques.

Recenser la diversité des cultigènes

Comme nous l'avons vu précédemment, le maïs a longtemps été considéré comme la production principale et majoritaire des Mayas, avant que les travaux sur le régime alimentaire démontrent qu'il n'en représentait qu'un tiers au cours de la période préclassique (Van der Merwe et al., 2002). L'enregistrement du pollen de maïs dans les sondages sédimentaires des zones humides ne laisse aucun doute sur le fait qu'il était cultivé à la marge de ces mêmes zones humides, du fait des courtes distances parcourues par son grain de pollen (Fig 7.4). De même, les enregistrements de $\delta^{13}\text{C}$ dans les sédiments de *bajo* permettent, également, de mettre en évidence la présence de la culture du maïs en marge des zones humides (Beach et al., 2011).

L'identification des autres cultigènes est en revanche plus aléatoire. Les courges (*Cucurbita* sp., *Lagenaria* sp.) sont principalement identifiées dans les sondages grâce à leur pollen (Pohl et al., 1996 ; Rushton et al., 2012 ; Beach et al., 2015) mais peuvent l'être aussi grâce aux phytolithes (Luzzader-Beach et al., 2017). Le pollen de haricot (*Phaseolus vulgaris*) semble moins présent dans les diagrammes palynologiques mais a, au moins, été identifié au Belize (Pohl, 1990). Les Solanaceae, comme le piment (*Capsicum* sp.) ou la tomatille (*Physalis* sp.), ont également été observés dans les basses-terres mayas (Rushton et al., 2012 ; Dunning et al., 2015b). Enfin, certains pollens de plantes racines ou de plantes médicinales ont également été enregistrés dans les sédiments des basses-terres comme le pollen de manioc (*Manihot esculenta*) ou de *joyweeds* (*Alteranthera* sp.) (Pohl et al., 1996 ; Luzzader-Beach et al., 2017 ; Dunning et al., 2019).

Le cas des plantes racines est intéressant car on procède par bouturage anté-floraison et non par reproduction sexuée pour les multiplier, limitant ainsi, la production pollinique. Les connaissances actuelles sur ce type de culture proviennent plutôt des macro-restes botaniques mais principalement par les fouilles menées à Cerén au Salvador, un site recouvert rapidement par des cendres volcaniques. Ce type exceptionnel de conservation a permis de mieux comprendre la production alimentaire dans un village maya (Lentz et Ramirez-Sosa, 2002 ; Sheets et al., 2011 ; Kaplan et al., 2015). Les résultats montrent des champs éloignés et des jardins plus proches des maisons, avec des cultures très diversifiées, composées de plantes annuelles comme le maïs, les courges, les haricots, les poivrons et les piments, d'arbres fruitiers comme les avocatiers (*Persea americana*) ou le goyavier (*Psidium* sp.) mais surtout de nombreuses plantes racines. Le manioc y était une culture aussi importante que le maïs qui s'étendait, également, dans des champs au-delà du village (Sheets et al., 2011). Parmi les autres plantes racines, ont été retrouvés la patate douce (*Ipomoea batatas*), l'arrow-root (*Maranta arundinacea*), le faux taro (*Xanthosoma sagittifolium*) ou encore le canna (*Canna indica*). Aujourd'hui, il semble que les plantes racines ont été tout aussi importantes dans les cultures mayas que le maïs et même dans les basses-terres centrales (Pohl et al., 1996 ; Luzzader-Beach et al., 2017).



Point Tardigrade : Contre le grain

Dans sa thèse sur l'apparition des premiers états, James C. Scott (2019) considère que seules les céréales peuvent servir d'impôt étant donné leur divisibilité, leur évaluabilité, leur stockabilité, leur transportabilité mais également parce que leur cycle de vie est prévisible. Ainsi les sociétés étatiques ont eu tendance à favoriser et encourager la production de céréales au détriment de plantes plus nutritives mais moins évaluables fiscalement comme les plantes racines, tubercules ou encore les légumineuses. Ce travail a été mené en Mésopotamie. Il serait intéressant de voir dans les basses-terres si l'augmentation de la production de maïs est concomitante des premières cités-états au détriment des plantes racines cultivées de manière importante dans les villages préclassiques.

Reconstituer les pratiques passées

Parmi les nombreux sondages des basses-terres centrales étudiées, beaucoup présentent des arbres fruitiers dans leurs registres palynologiques. Il s'agit d'arbres ou d'arbustes produisant, principalement, des fruits comestibles comme le nance (*Byrsonima crassifolia*) ou encore le *Simarouba glauca* (Beach et al., 2015 ; Luzzader-Beach et al., 2017 ; Wahl et al., 2016). Rushton et al. (2012), indiquent également, que certaines espèces de palmiers puont également pû être cultivéescultivées, comme *Acrocomia aculeata* et/ou *Attalea cohune*. Ces arbres fruitiers sont, en général, considérés comme cultivés sous forme de forêts-jardins ou de complexes agroforestiers entretenus (Diemont et al., 2006 ; Ford et Nigh, 2009). Il s'agit d'une pratique agraire facilement mise en évidence par les pollens, mais qui hélas, pose plus de problèmes avec les phytolithes qui ne produisent, en général, aucun morphotype diagnostique de ces taxons (Piperno, 2006). Il est à noter que parfois, des espèces d'arbres fruitiers ou utiles sont conservées, en parallèle, d'une culture de céréales dans un *bajo* (Chapitre 4).

La culture du maïs dans les basses-terres est, en général, considérée développée dans un système agraire de type abattis-brûlis itinérant, nommé *milpa*, variant dans le temps et dans l'espace. L'utilisation des pollens et des NPPs a amplement démontré l'existence de cette pratique sur les territoires mayas. Les travaux sur le lac Tuspan ont montré le plus vieil enregistrement de *milpa*. En effet, dans la carotte du lac Tuspan, Galop et al. (2004) lient les augmentations de pollens de *Cecropia* sp., un taxon pionnier héliophile des écosystèmes perturbés, aux diminutions de pollens de maïs. Ces informations leur permettent de conclure à un système de culture avec des alternances de jachères. La séquence préclassique d'un sondage attendant au lac Tuspan (sondage Tambo – Galop et al., 2004) a également montré la présence dans les sédiments de spores de *Conochieta* cf. *lignaria* qui indique l'utilisation du feu pour ouvrir les environnements végétaux. L'ensemble de ces indices palynologiques a permis aux auteurs (Galop et al., 2004 ; Carozza et al., 2007) de proposer la plus ancienne trace attestée d'une pratique d'abattis-brûlis pour la culture du maïs dans les basses-terres centrales.

Le signal de microcharbon a été utilisé à plusieurs reprises dans la région pour montrer une augmentation des activités humaines (Dunning et al., 1998 ; Rushton et al., 2012 ; Wahl et al. 2013 ; Walsh et al., 2014 ; Wahl et al., 2016). Toutefois, les variations à haute fréquence sont difficiles à interpréter en parallèle de l'enregistrement du pollen de maïs. Si l'ouverture du milieu est attestée, le type de pratique ne semble pas pouvoir en être extrapolé.

Certains niveaux cultivés, attestés par le pollen de maïs, présentent toutefois des taux faibles de microcharbon, supposant ainsi des régimes de feu réduits (Pohl et al., 1996 ; Wahl et al., 2013 ; Walsh et al., 2014). Cette information indique qu'il existe des pratiques agraires en zone humide qui n'ont pas besoin du brûlis pour apporter la matière organique de la canopée au sol. Il semble évident que ce type de culture extensive est, de près ou de loin, associée aux structures géomorphologiques de types champs ou canaux surélevés, comme présentés ci-avant.

ii). Des traces LiDAR pour confirmer le type de culture à Naachtun ?

A Naachtun, le programme LiDAR a cartographié la surface de l'ensemble du site de Naachtun et du *bajo* nord (Canuto et al., 2018). Son étude a permis de mettre en avant la présence de structures anthropiques semblables aux buttes et champs surélevés, présentées ci-dessus. La datation de certaines de ces structures indiquent des âges Préclassique à Classique (Castanet, *communication personnelle*), montrant, ainsi, une activité soutenue des Mayas dans le *bajo*. Si le sondage M2S10 n'est pas positionné sur l'une de ces structures, certains indices et réflexions nous conduisent à valider l'hypothèse d'une culture du maïs en zone humide en M2S10.

Les assemblages de phytolithes présentent de fortes teneurs en morphotypes d'herbacées, interprétées comme des formations végétales ouvertes. Le référentiel moderne de PAYAMA (chapitre 4) a montré que ces formations durables ouvertes ne pouvaient pas être enregistrées dans des cycles végétaux entrecoupés de jachères longues. En absence de jachère pour régénérer la matière organique, il semble alors peu probable qu'une culture de maïs soutenue, nécessitant des apports organiques, ait pu se maintenir.

Enfin, un élément de réponse provient du paléosol S10-US4. Le sondage profond M2S10 ne permet pas d'avoir une idée de son extension spatiale au sein du *bajo*. Les concentrations des bioindicateurs siliceux de l'unité S10-US4 correspondent à un environnement humide pérenne et donc non saisonnier, inadéquat à la culture du maïs. Le rapport C:N augmente drastiquement, indiquant la présence de plantes vasculaires étrangères au *bajo* (puisque les arbres et plantes vasculaires typiques du bajo ne modifie pas les basses valeurs de C :N de la zone – Christine Hatté, *communication personnelle*). Enfin, la micromorphologie, réalisée par Louise Purdue, indique une phase d'oxydation de la matière organique, caractéristique d'une

exondation du milieu. Cette dernière information est contradictoire avec les concentrations de diatomées et de spicules.

Aux vues de ces données entremêlées et contradictoires, je propose une hypothèse ayant pour but de résoudre cette incompatibilité : M2S10 serait la position d'un ancien champ surélevé. Il a été montré que les canaux adjacents aux structures agraires étaient curés et que la matière draguée était déposée sur les champs et les buttes (Pohl et al., 1990 ; Lemonnier, 2006). Cet apport serait à l'origine des riches proportions en spicules d'éponges et diatomées. A cette période du Préclassique récent (400 BCE – 200 BCE), les niveaux régionaux d'humidité sont encore importants et il est possible d'imaginer des canaux qui drainent l'eau, une majeure partie de l'année et dont les dépôts sédimentaires sont riches en frustules et en spicules. La culture du maïs, possède un C:N relativement plus important que les sédiments de canaux à l'air libre (Meyers et Teranes, 2001). Cela expliquerait, à la fois, l'augmentation du rapport C:N et l'oxydation de la matière organique.

Cette hypothèse est cohérente avec les données LiDAR puisqu'elle s'en inspire directement. En résumé, l'ensemble des indices disponibles amène à proposer la présence d'un champ surélevé dans la zone de M2S10 au cours du Préclassique récent (400 – 200 BCE – Fig 7.6). Si cela est vérifié, il serait possible de considérer ce type de cultures comme une adaptation des habitants de Naachtun à des changements environnementaux, comme les hauts niveaux lacustres.

2. Défrichement du territoire de Naachtun au Préclassique récent

i). Ouverture généralisée du *bajo*

La période du Préclassique récent (400-200 BCE) est enregistrée dans l'ensemble des sondages réalisés dans le *bajo*. En M1S2c, il correspond à l'US7 quand, en M2S1, le Préclassique récent débute à l'US4 (Fig 5.2). Les assemblages de phytolithes de ces niveaux, sont caractérisés par une bonne représentation des morphotypes d'herbacées (Poaceae, Cyperaceae). Ces résultats préliminaires laissent penser à une ouverture généralisée du *bajo* pour cette période.

L'unité S2-US7 présente un assemblage relativement mixte comme l'indique l'indice LU (chapitre 5) composé à moitié, de phytolithes provenant de ligneux et à une autre moitié, de phytolithes produits par des herbacées. Ces dernières sont représentées par de fortes concentrations de phytolithes de Poaceae, dont une majorité de Panicoïdeae, et également de nombreux morphotypes de Cyperaceae qui ne correspondent pas à ceux trouvés dans les environnements humides modernes (chapitre 3). Cet assemblage pourrait indiquer un héritage de plantes adventices dans un environnement arboré. Ce qui surprend dans ce niveau, ce sont les proportions de morphotypes Hat-shape qui, si elles sont peu prononcées (< 10%), demeurent plutôt stables. Cette occurrence est significative puisque ces

morphotypes, indicateurs de palmiers, ne sont présents dans aucun autre niveau des sondages sédimentaires.

Aujourd'hui, à Naachtun, ce type de phytolithes n'est produit que par les *Chamaedorea* sp. qui sont des palmiers Arecoïdeae, supportant assez mal les inondations. Ils sont révélés assez rares dans le *bajo* moderne et sont, surtout, peu représentés dans le référentiel moderne phytolithes (Testé et al., 2020). Il n'y a pas d'explication quant à la présence constante de *Chamaedorea* à cette époque dans le *bajo*. En revanche, les palmiers *Acrocomia aculeata* et *Attalea cohune*, considérés comme cultivés dans la zone humide de Lamanai (Rushton et al., 2012), à 70 km à l'est de Naachtun (Fig 7.3), appartiennent également aux Arecoïdeae et produisent ce morphotype de phytolithes (Thomas, 2011). Il n'est pas question, bien entendu, d'affirmer que ces palmiers sont cultivés à Naachtun, les phytolithes n'ayant pas la capacité de valider leur occurrence taxonomique (Fenwick et al., 2011). En revanche, il est possible de s'inspirer de ces travaux pour proposer l'hypothèse de la présence d'une forêt-jardin à Naachtun. Ce type de culture pourrait favoriser la présence d'adventices herbacées par une taille horticole des ligneux héliophiles, et correspondrait à la formation d'un assemblage interprété comme un environnement moins fermé qu'un écosystème forestier moderne de *bajo*.

L'unité S1-US4 présente un assemblage où les morphotypes de Panicoïdeae ont augmenté de manière importante et où, le taux de Cross a doublé par rapport aux autres échantillons (chapitre 5). Ces variations sont semblables à celles observées pour M2S10. Toutefois, un seul échantillon compose cette US et aucune étude morphométrique de Cross n'a été réalisée sur ces niveaux. À défaut de pouvoir conclure à une phase d'agriculture en M2S1, les valeurs d'indice de l'assemblage confirment la présence d'une zone de végétation ouverte et laissent penser à une généralisation de l'utilisation du *bajo* au Préclassique récent qui conduit ici à son ouverture.

ii) Les indices d'ouverture des zones escarpées

Le sondage géoarchéologique THT1 se situe à 10 mètres en dénivelé, sur le versant du *bajo*, par rapport à M1S2c (Fig 7.1). Ce sondage était interprété comme une potentielle zone de terrasse agricole. Les UE.3159 et UE.3158 de ce sondage présentent des assemblages mixtes, avec 40% de morphotypes d'herbacées dont 10% sont rattachés à des Cyperaceae supposés adventices. Cet assemblage est très similaire aux assemblages des US7 et 6 du sondage sous-jacent de M1S2c. Les différences majeures consistent en l'absence de spicules d'éponges et de diatomées sur les assemblages du sondage THT1 et à une différence dans les populations de palmiers. Cette concordance des assemblages peut faire penser à un transect environnemental où un déboisement des escarpements serait en lien avec les activités humaines. Cela pourrait nous conforter dans l'idée d'une exploitation agricole précoce des hautes-terres et de manières complémentaires aux zones du *bajo*. Mais, aucune date

céramique ou radiocarbone ne sanctionne ces niveaux pour THT1 et cette proposition n'est, pour le moment, qu'au rang d'hypothèse non-vérifiable.

D'un point de vue archéologique, la période 400-200 BCE correspond aux premières traces de bâti architectural à Naachtun (Fig 7.2). Les estimations de population sur le site sont, pour la fin de cette période Préclassique, de 168 à 315 habitants pour un âge à 150 CE (Hiquet, 2019). Ce qui laisse à penser qu'à cette date de 400-BCE, la population est relativement moindre. Cette première occupation attestée coïncide, toutefois, avec les données obtenues sur les bioindicateurs d'une ouverture généralisée. Ainsi, pour conclure, il est possible de considérer qu'au Préclassique récent, les écosystèmes du *bajo* sont, pour la plupart, soumis aux activités humaines, attestées agricoles ou non.

IV. Transition Préclassique-Classique et période Classique à Naachtun (150 – 950 CE)

1. Implication d'un changement de régime sédimentaire

i). Érosion, stratigraphie et temporalité

L'interprétation de la stratigraphie du *bajo* pour les niveaux Classique est rendue difficile par plusieurs facteurs. Après les dernières dates de la période Préclassique récent, la sédimentation de M2S10 et M1S2c n'est plus litée mais prend la forme d'une couche épaisse d'argile particulièrement perturbée (chapitre 5). Sur ces sondages, ces niveaux argileux forment, respectivement, les ensembles sédimentaires M2-E1 et M1-E1. En M2S10, l'ensemble E1 n'est calibré par aucune datation. L'ensemble E1 de M1S2c est calibré par deux dates. Le sommet de l'ensemble E2, daté à partir d'un charbon sur une passée colluviale (Castanet, 2017), semble problématique quant à son origine incertaine. La date réalisée sur la matière organique globale de l'US3 du début de la période Classique est considérée comme peu fiable en raison des processus d'argilo-turbation de ces niveaux. L'ensemble sédimentaire supérieur de M1S2c semble donc, également, assez mal calé dans le temps.

En revanche, sur M2S1, la période Classique représente la seconde partie de l'ensemble carbonaté E2 puisque la base de l'ensemble E1 est datée à 896-1021 CE (Fig 7.5). La diminution du taux de carbonate de M2S1 débute à partir de la fin de la période Classique. Cette diminution soudaine synchrone à l'abandon du site pourrait soutenir l'hypothèse que les fortes valeurs de CaCo₃ dans les sédiments lacustres sont liées à l'activité humaine. Par ailleurs, on retrouve cette même baisse drastique des carbonates dans l'US2 du sondage M1S2c.

Pour M1S2c et M2S10, l'absence de datation sur l'ensemble supérieur nous pénalise dans nos interprétations paléoenvironnementales. Puisque la diminution importante de la seconde phase de carbonate est calibrée temporellement en M2S1 et visible en M1S2c, elle peut être utilisée comme un potentiel indicateur stratigraphique de la fin de la période Classique. Toutefois cette baisse des carbonates n'est pas identifiable pour M2S10. Cette

absence peut s'expliquer par un arrêt prématuré des mesures de la courbe des concentrations de carbonates dans l'unité S10-US2. Il est possible de poser comme hypothèse que la baisse des carbonates, pour M2S10, intervient dans la transition entre S10-US2 et S10-US1. Cette transition sédimentaire correspond également à la transition écologiques S10-Z2 et S10-Z1 (Fig 7.2). Ainsi la limite Classique / Postclassique serait localisée à 15cm de la surface pour le sondage M2S10. En d'autres termes, à l'exception de l'US1, l'ensemble M2-E1 du sondage M2S10 est représentatif de la période Classique (Fig 7.2). Dans le contexte hydrologique actuel, l'absence ou le très faible dépôt de sédiments pour M2S10 durant les périodes Postclassique et Coloniale peut s'expliquer par un éloignement des zones de versants ou des zones humides. Cette interprétation ne constitue toutefois qu'une hypothèse pratique pour l'exercice de reconstitution paléo-environnementale de Naachtun, qui ne pourra être vérifiée qu'en présence de datation.

ii). Migration des plans d'eau

Les données des bioindicateurs montrent qu'au cours de la période Classique une phase lacustre est enregistrée en M2S1 après la période d'ouverture. Cette interprétation est soutenue par les fortes valeurs de diatomées. Cette phase lacustre correspond au commencement de la seconde phase d'augmentation des carbonates en M2S1. Cette phase lacustre évolue, ensuite, vers un assèchement progressif du milieu qui se traduit par un environnement de *sival* puis de forêt de *bajo* (Fig 7.5). Si sur les deux autres sondages, on retrouve une expression de cette seconde phase carbonatée, les assemblages de bioindicateurs ne semblent pas réagir de la même manière. Concernant M2S10, l'ensemble sédimentaire E1 est caractérisé par des formations végétales herbacées qui évoluent à mesure que les bioindicateurs siliceux diminuent, indiquant également une période d'assèchement.

Un point remarquable concerne M2S10. Alors que ce sondage semble être une zone d'agriculture en contexte humide pérenne au cours du Préclassique, la sédimentation de la période Classique ne laisse aucun indice d'une zone humide pérenne. L'humidité en M2S10 au cours du Classique n'est présente que saisonnièrement. A l'inverse, M2S1, qui semblait être une zone relativement épargnée par les épisodes humides pérennes au cours du Préclassique, est inondée durant une grande partie de la période Classique. Cette variation spatiale et temporelle peut être interprétée comme une migration de plan d'eau.

Ailleurs dans les basses-terres centrales, les recherches géomorphologiques ont montré qu'un phénomène important d'aggradation avait eu lieu dans de nombreux *bajo* (Dunning et al., 2019). Ces processus de dépôt ont modifié l'hydrologie locale et ont entraîné la transformation de lacs peu profonds ou de plans d'eau pérennes en marécages saisonniers (Dunning et al., 2002 ; Beach et al., 2009 ; Dunning et al., 2019), phénomènes aggravés par un réchauffement climatique à la transition Préclassique/Classique (Fig 7.4 – Douglas et al., 2016). Les épais dépôts d'argile qui recouvrent les sédiments lacustres en M2S10 pourraient

correspondre à cette phase d'aggradation, étant donné leur morphologie perturbée semblable à celles proposées par Dunning et al., 2002. On retrouve ce même processus sédimentaire en M1S2c, où les dépôts argileux épais sont synchrones d'une diminution des bioindicateurs siliceux, avant le retour post-Classique d'une phase plus humide en pied de versants. L'absence de tels dépôts en M2S1 pourrait s'expliquer par sa position centrale dans le *bajo* et donc son éloignement par rapport aux versants. La sédimentologie de M2S1 aurait été peu perturbée par les tabliers d'érosion, positionnés en marge du *bajo*.

2. Naachtun au Classique : une mosaïque de paysages

i). Abandon ou maintien des perturbations à l'ouest du bajo ?

Les assemblages de bioindicateurs à l'ouest du *bajo* sur les sondages M2S10 et M2S1 semblent assez contradictoires sur la base de leur signal hydrologique, on l'a vu, mais également sur la perception des environnements comme nous allons le voir.

Le sondage M2S10 montre des assemblages interprétés comme des formations assez ouvertes, dominées par les Panicoïdeae et avec la présence, sur l'US2, de phytolithes de Cyperaceae plutôt terrestres qu'aquatiques. Ils sont interprétés comme des adventices pour M1S2c au Préclassique. Les bioindicateurs siliceux indiquent, toujours, des inondations périodiques, certainement saisonnières et les faibles valeurs du rapport C:N ne suggèrent pas d'apports particuliers de plantes vasculaires. A ce stade, les arguments, pour soutenir une utilisation de cette zone à des fins agricoles, sont minces.

Toutefois, dans les basses-terres, la reconquête d'un territoire perturbé par les plantes pionnières est en général rapide, à moins que les peuplements végétaux ne soient retirés à grande distance (Ferguson et al., 2003). Or pour la même période, les sondages M2S1 et M1S2c indiquent des occupations forestières dans le *bajo* et les données anthracologiques de Naachtun suggèrent que les taxons des escarpements et du *bajo* sont présents et gérés, tout au long de la période Classique par les populations mayas (Fig 7.2 – Dussol, 2017). De plus, au cours de la période Classique les besoins en bois sont d'autant plus importants que les populations augmentent (chauffage/cuisine notamment, construction et stuc). Dunning et al., 2019 proposent d'ailleurs qu'une grande partie des réserves de bois soit localisée dans les *bajo*. Les résultats du référentiel moderne PAYAMA nous permettent de considérer qu'il ne s'agit pas d'une zone de pratique de la jachère. Le cas contraire aurait conduit à la production d'assemblages dominés par les phytolithes de ligneux. Ces arguments ne permettent pas, non plus, d'appuyer une déprise agricole ou une mise en jachère de la zone. Aux vues des populations importantes de la période Classique (Fig 7.2) et de leur besoin alimentaire, il semble plus raisonnable d'imaginer une occupation de cette zone par l'homme, potentiellement par des cultures non-perceptibles par les phytolithes, comme le manioc ou les Solanaceae (Fig 7.6).

Le sondage M2S1 est interprété, pour le Classique, comme une zone d'eau marécageuse pérenne ou saisonnière (Fig 7.2). Si les dépôts témoignent pour certaines périodes d'une diminution de la zone d'eau, certainement en lien avec des périodes d'assèchement au Classique récent (Fig 7.4 ; Douglas et al., 2016), ces écosystèmes ne semblent pas avoir fait l'objet de modifications humaines. Il paraît plausible d'interpréter cette zone humide comme un lieu de stockage ou de ressources en eau pour les populations mayas (Fig 7.6). L'absence de bourrelets et de digues, dans les observations de terrain et la prospection LiDAR, autour de la zone humide indique, en revanche, que cette zone n'a pas été entretenue à cette fin.

ii). Un abandon précoce du *bajo* à l'est ?

A l'est du *bajo* (M1S2c), les assemblages de mollusques et de phytolithes indiquent une fermeture de l'environnement et la mise en place d'écosystèmes forestiers au cours de la période Classique (Fig 7.2). Les résultats anthracologiques attestent la présence de ligneux héliophiles et typiques d'environnements de *bajo* (Dussol, 2017). Pour autant, l'installation pérenne d'une zone forestière Classique à proximité immédiate du site, à une période où la population s'accroît fortement (Hiquet, 2019), doit être discuté.

Nos connaissances sur l'enregistrement des pratiques agricoles par les phytolithes apportent des éléments de discussion. Le début de la période Classique est marqué par un important épisode de sécheresse (Fig 7.4 - Douglas et al., 2016), en même temps, que l'arrivée d'une population déplacée de sites voisins (Hiquet, 2019). Cet environnement fermé, attesté par les assemblages phytolithiques pourraient correspondre, à l'enregistrement des pratiques de brûlis à Naachtun en réponse à l'épisode climatique sec de début du Classique. Cet épisode a visiblement causé une diminution des nappes d'eau disponibles à Naachtun comme le montre la diminution des bioindicateurs siliceux. Cet assèchement aurait pu diminuer l'espace disponible dédié à la culture en zone humide, poussant les populations à développer de nouvelles pratiques pour l'incorporation de matière organique dans les sols (Fig 7.6). Le signal forestier des phytolithes correspondrait, en réalité, à l'enregistrement de cycles de jachères. Les données anthracologiques indiquant la présence de plantes pionnières et héliophiles, au cours du Classique, sont en accord avec cette hypothèse. De plus, cette dernière a le mérite de répondre aux questions d'approvisionnement en bois pour les besoins domestiques et politiques. En effet, la croissance rapide des forêts secondaires dans cette zone tropicale (Ferguson et al., 2003), assure des stocks de bois relativement renouvelables.

En l'absence de données sur les microcharbons pour reconstituer les régimes de feu à Naachtun, cette hypothèse ne peut pas être vérifiée. Cependant, certains travaux régionaux ont montré des changements de régimes de feu entre la période Préclassique et la période Classique. Au sud du Belize, Walsh et al., (2014) observent une baisse des concentrations de charbons qui commence au Préclassique moyen avec des minimums au Préclassique récent,

avant d'observer une remontée des valeurs à la période Classique. Les auteurs considèrent qu'un changement d'intensité ou de stratégie agricole est plus cohérent pour expliquer le déclin du brûlage puis son accroissement au Classique. Le même type d'enregistrement de signal incendie a été réalisé par Wahl et al. (2013) au lac Yaloch. Les valeurs de charbons sont faibles pendant toute une partie du Préclassique et augmentent au cours du Classique. Wahl et al. (2013) expliquent ce différentiel par un changement de stratégie agricole. Ils considèrent que le Préclassique est plutôt marquée par des méthodes intensives de champs et canaux surélevés nécessitant peu d'incendie.

iii). Un signal intrasite perturbé ?

En contexte intra-site, une partie des dépôts ont été datés de la période Classique (150-950CE). Les rares échantillons, riches en phytolithes, indiquent des morphotypes indicateurs de la présence et de l'impact des populations mayas sur le site (Fig 7.2).

Les échantillons, de la période Classique ancien, prélevés dans des niveaux de sols argileux bruns et grumeleux du groupe A et B du site, présentent des assemblages dominés par les morphotypes produits par les Poaceae, principalement, des Lobate et Saddle. L'origine de ces dépôts anthropiques et ainsi des phytolithes qu'ils contiennent pose question. L'absence de spicules d'éponges ou de diatomées dans ces dépôts permettent d'écarter l'hypothèse d'un apport depuis la zone humide. En revanche, les phytolithes à eux seuls ne permettent pas de renseigner de manière plus précise l'origine de ces restes de Poaceae. Il est difficile de savoir s'il s'agit d'un amendement particulier (dépôts de fanes d'herbacées, matière fécale, ...) ou bien d'une végétation en place enregistrée dans un niveau de sol. Dans tous les cas, cet assemblage peut être interprété comme une production importante de végétaux herbacés. Ces types d'assemblages ne sont pas caractéristiques des environnements forestiers des zones escarpées mais n'apportent pas d'autre information que la présence humaine sur le site, déjà validée par les données archéologiques (Fig 7.2).

L'étude du sondage 5N6-S9, au sud du groupe A (Fig. 7.1), et de ses dépôts datés du Classique, a livré, majoritairement, des assemblages fermés typiques de milieux forestiers. L'enregistrement de phytolithes de courges sur un niveau indiquerait sa culture sur le site. Si les courges sauvages ont, en effet, été enregistrées dans des environnements forestiers de *bajo*, elles sont surtout associées aux conditions humides et à la strate végétale basse de ces environnements. La présence de courges sauvages sur les hauteurs du site, dans un milieu forestier, est peu probable, en raison des distances des zones humides au Classique récent. Il est donc possible de supposer la présence d'un jardin arboré, à proximité de l'habitation de la structure archéologique 5N6. La présence de jardins en contexte intensif et urbain est déjà amplement référencée dans les basses-terres mayas (Lemonnier, 2006).

V. Disparition des perturbations écologiques post-classiques (> 950 CE)

1. Mise en place des écosystèmes modernes dans le *bajo*

En continuant à considérer la baisse des carbonates comme indication stratigraphique marquant la fin de la période Classique, il est possible de proposer une reconstitution des environnements qui se développent suite à l'abandon du site.

Comme il a déjà été vu, les assemblages de phytolithes, de la période post-Classique à moderne du sondage M2S1, présentent des variations naturelles typiques d'avancée et de recul de la zone humide en fonction des fluctuations climatiques. Après la période de sécheresse du Classique terminal, un environnement de *Tintal* s'installe, montrant un retour de conditions plus humides. Le plan d'eau associé à M2S1 n'a pas semblé être affecté au cours du Classique et a donc continué de fonctionner « naturellement », après l'abandon du site de Naachtun.

Concernant M2S10, les niveaux sédimentaires correspondant au dernier millénaire sont condensés sur les 15 derniers centimètres du sondage. On y observe un retour progressif de la forêt mais les fluctuations climatiques observées sur M2S1 ne sont pas détectables.

Concernant M1S2c, les assemblages qui suivent la fin supposée de la période Classique, continuent à être interprétés comme des zones de forêts. La transition écologique, d'une forêt de jachère à une forêt de déprise agricole (jachère longue) puis mature (paraclimacique), n'est pas enregistrée par les phytolithes dans les basses-terres (chapitre 4). Ainsi, la perpétuation de formations végétales fermées après la période d'abandon du site correspond à une forme de déprise agricole. Les assemblages malacologiques et phytolithiques montrent une transition vers un environnement plus humide de *sival* au cours des 1000 dernières années. Cet environnement peut illustrer une réponse à un climat moins sec, établi à la période Postclassique et coloniale (Fig 7.4 – Douglas et al., 2016).

2. Signal forestier de l'intrasite

Les échantillons intrasites, qui datent de cette période post-abandon, sont relativement peu nombreux. Les sondages 5N6-S9 et THT1 présentent, respectivement, des niveaux à 900 CE et 1500 CE. Ces deux contextes intrasites possèdent des assemblages de phytolithes semblables indiquant une richesse en palmiers dans une zone forestière. L'assemblage de l'échantillon de 5N6-S9 suggère que le jardin de la période Classique n'est plus en activité à cette période. Enfin, l'échantillon à 1500 CE de THT1 témoigne d'une végétation fermée à la fin du Postclassique.

Ces observations sont en adéquation avec les données archéologiques disponibles sur l'histoire de Naachtun (Fig 7.3). A partir du Classique terminal, le site subit une crise démographique et une réorganisation spatiale, abandonnant le groupe A et C pour se

recentrer sur le groupe B, marquant ainsi la fin de la période monumentale. Les dernières traces d'occupation du site de Naachtun Naachtuun datent de la fin du Classique terminal (950-1000 CE), phase marquée par de nombreux dépôts d'abandon (Sion, 2016).

Conclusion :

Ce chapitre avait pour but de proposer une histoire environnementale du site de Naachtun au regard des données obtenues avec les bioindicateurs, mais également, par l'intégration des données géomorphologiques et archéologiques du site (Fig 7.2) et des données paléoenvironnementales disponibles à l'échelle de la région (Fig7.5). Ainsi, cinq phases majeures ont pu être identifiées dans l'évolution paléoenvironnementale du territoire de Naachtun (Fig 7.6). Même si elles ne sont pas synchrones avec l'histoire archéologique du site, elles participent à renforcer notre connaissance des interactions sociétés-environnements dans les basses-terres mayas.

- Les plus anciens indices d'une occupation humaine dans les basses-terres mayas datent de la **période Archaique** et se trouvent à une cinquantaine de kilomètres à l'ouest et à l'est de Naachtun (Pohl et al., 1996 ; Wahl et al., 2007). Ainsi, l'ouverture partielle des écosystèmes du *bajo*, avant 1600 BCE qui est observée à Naachtun, peut être interprétée comme la première trace d'un défrichement par l'action de l'homme, et ce, malgré l'absence de cultivar.
- Au **Préclassique moyen**, période caractéristique d'une phase climatique humide à l'échelle régionale (Fig 7.4), les concentrations de diatomées et les assemblages de mollusques indiquent la présence d'un paléolac qui occupe la partie ouest du *bajo* (Fig. 7.6).
- Au **Préclassique récent**, les premières traces d'agriculture sont attestées dans le *bajo*, sous la forme de phytolithes de maïs et de rapports C:N compatibles avec la culture de maïs (Wahl et al., 2013). Cette phase d'agriculture a lieu dans une zone humide pérenne indiquée par les bioindicateurs siliceux tandis que la micromorphologie indique un paléosol organique exondé saisonnièrement. Les populations de Naachtun semblent avoir développée une agriculture sous forme de champs surélevés en zone humide. A l'est du *bajo*, zone moins humide, les assemblages de phytolithes soutiennent le développement de possibles parcelles agroforestières (Fig 7.6).
- **La période Classique** est caractérisée par une sédimentation argileuse épaisse et très perturbée, ce qui rend difficile l'interprétation paléoenvironnementale. Néanmoins, le *bajo* semble toujours occupé et utilisé par les populations mayas et constitue une mosaïque de paysages. Les pratiques agricoles semblent y avoir changé depuis les périodes Préclassique, passant d'une agriculture développée en contexte de zone humide à une agriculture plus proche de la *milpa*.

- Les échantillons, datés d'une ***période post-abandon*** du site, semblent montrer des écosystèmes para-climaciques, sans trace de perturbation résiduelle. Tant dans le *bajo* que sur le site, l'ensemble des assemblages fossiles de cette période sont semblables à ceux identifiés actuellement par notre référentiel (Testé et al., 2020).

Ces résultats témoignent de la grande variété de pratiques agraires développées par les populations mayas et reflètent ainsi leur capacité à s'adapter aux modifications de leur environnement en réponse aux variables de contrôle naturelles et / ou anthropiques. A rebours d'une vision catastrophiste d'un « suicide écologique », cette démarche multiproxy et multiscalair témoigne du rôle joué par les mayas dans la transformation des écosystèmes mais elle souligne aussi la diversité des pratiques mises en œuvre sur 2000 ans d'histoire et traduit plutôt une représentation consciente de l'environnement tropical et de ses spécificités écologiques. Si aujourd'hui, nos crises environnementales sont à mettre sur une sécession des sociétés occidentales à la Nature, l'application de cette problématique moderne à la civilisation maya ne semble finalement pas pertinente.

- CONCLUSION GÉNÉRALE -

Ce travail de recherche doctorale en géographie propose une reconstitution des dynamiques environnementales du site de Naachtun dans les basses-terres mayas, au cours de son occupation par les populations humaines. Ces réflexions, comparées avec les travaux archéologiques et environnementaux locaux et régionaux, ont conduit à estimer les paramètres de contrôle à l'origine de ces changements (climatiques et/ou anthropiques). Ces conclusions ont été possibles par la réalisation conjointe de deux approches, utilisant d'une part, les méthodologies naturalistes et de l'autre, les méthodologies géographiques. Ainsi, l'interprétation écologique et temporelle des assemblages de phytolithes et de bioindicateurs complémentaires (spicules d'éponges, diatomées, mollusques) tout en prenant en compte leurs représentativité et complémentarité spatiales, a permis d'amener une discussion socioenvironnementale à l'échelle du territoire de Naachtun pour les 4 derniers millénaires.

Si ce type d'études de reconstitutions des interactions sociétés-environnements de sites archéologiques, bien que récentes, a été mené avec succès et à plusieurs reprises dans les basses-terres mayas (Wahl et al., 2006 ; 2013 ; Carozza et al., 2007), l'originalité de ce travail repose sur le développement méthodologique d'un nouvel indicateur paléoenvironnemental pour la région, que sont les assemblages de phytolithes. Ce sont ces progressions novatrices pour la région qui sont ici proposées à la discussion.

Nécessité de l'approche actualiste...

Les travaux qui ont été menés jusqu'à présent dans les basses-terres mayas avec les phytolithes (Cummings & Magennis, 1997 ; Bozarth & Guderjan, 2004 ; Beach et al., 2009), ont proposé des interprétations par morphotypes et non par assemblages, méthode qui a pourtant montré son efficacité en Amérique du Sud dans la caractérisation des environnements tropicaux forestiers modernes et fossiles (Dickau et al., 2012 ; 2013 ; Watling et al., 2016 ; 2017). La première partie de cette recherche s'est donc astreinte à calibrer les assemblages de phytolithes modernes d'écosystèmes forestiers et ouverts du territoire de Naachtun, aujourd'hui abandonnés, mais également, d'environnements anthropiques (*milpa*, jardin, jachère, etc.) de la communauté forestière de Uaxactun.

La construction de ce référentiel actuel de phytolithes, associé aux concentrations modernes de spicules d'éponges et de diatomées, a permis de montrer que les écosystèmes du territoire de Naachtun pouvaient être caractérisés par leurs propres assemblages. Ainsi, les zones ouvertes et/ou humides sont clairement discriminées des zones forestières tandis que ces dernières sont différenciées par les phytolithes produits par les associations végétales des sous-bois. Ce référentiel a été approfondi par l'ajustement de l'indice phytolithique D:P

(indice de couverture arborée) aux écosystèmes régionaux mais également par la calibration d'un nouvel indice LU permettant l'identification de zones végétales mixtes (Testé et al., 2020). La publication de ce travail, sous la forme d'un article, constitue la première base de référence régionale quant à l'utilisation des phytolithes, qui, si elle demande à être améliorée, constitue néanmoins un cadre de travail robuste pour l'interprétation des assemblages fossiles.

Le référentiel mené dans les écosystèmes agricoles moderne de Uaxactún a montré des assemblages homogènes ne permettant pas de discriminer les différentes pratiques modernes. Les assemblages y sont interprétés comme une végétation secondaire dominée par les palmiers tandis que les cultigènes, pourtant producteurs de morphotypes diagnostiques, n'y sont pas perçus. Cela a permis de mettre en évidence que les modes de cultures déterminent l'enregistrement des phytolithes dans les sols et que les pratiques d'abattit-brûlis itinérant (*milpa*) possèdent un cycle de régénération végétale trop rapide pour que les cultures à court-terme y soient enregistrées par les phytolithes. Ces résultats exploratoires et non-représentatifs de la diversité des pratiques agraires mayas nous renseignent tout-de-même sur la perception des pratiques anciennes de brûlis et sur la nécessité d'utiliser des bioindicateurs complémentaires en fonction des informations cherchées.

... pour proposer une reconstitution paléoenvironnementale !

La seconde partie de ce manuscrit avait pour but d'interpréter les assemblages de phytolithes fossiles depuis des archives sédimentaires et intrasites. Les enregistrements sédimentaires ont été prélevés dans la zone de *bajo* au nord du site tandis que les échantillons géoarchéologiques l'ont été principalement à l'intérieur du site archéologique sur les zones escarpées. Les assemblages de phytolithes de la zone humide ont pu être croisés avec des bioindicateurs apportant des informations sur les processus hydrologiques de la zone humide comme les assemblages malacologiques et les concentrations de spicules d'éponges et de diatomées. Cette approche multiscalaire avait pour but de tester la représentativité spatiale des signaux écologiques des bioindicateurs afin de reconstruire une histoire environnementale complète du site et tenter d'approfondir nos connaissances sur les pratiques agraires développées par les populations mayas pour les différentes périodes chronologiques.

L'étude des sédiments du *bajo* a permis de montrer que les phytolithes, au contraire des pollens, sont des bioindicateurs avec un fort potentiel pour les reconstitutions paléoenvironnementales à partir d'archives de zones humides saisonnières. En effet, de nombreux assemblages fossiles ont pu être interprétés, sur la base du référentiel moderne et des indices, comme semblables à ceux produits par les écosystèmes modernes. En revanche, l'autre partie des assemblages fossiles correspond à des formations végétales jusqu'alors non-référencées et pour la plupart, beaucoup plus ouvertes que les écosystèmes

modernes. Si les morphotypes de cultigènes ont permis l'identification de zones supposées cultivées, c'est l'utilisation complémentaire des bioindicateurs de l'hydrologie qui a permis de confirmer certaines hypothèses sur l'état de la zone humide, non-résolues avec les seuls phytolithes. A ce stade, l'étude des sédiments du *bajo* et les datations disponibles ont optimisé les interprétations paléoenvironnementales pour la période Préclassique, mais ont été moins favorables à une description détaillée des dynamiques environnementales de la période Classique.

Les archives de cette période d'occupation sont, en revanche, plus nombreuses sur les sondages géoarchéologiques du site. Néanmoins, les assemblages fossiles du site sont mal préservés et limités aux niveaux de sols grumeleux. Les différents protocoles testés ont permis de conclure que les niveaux archéologiques intrasites étaient moins favorables à la conservation et donc à l'étude des phytolithes que les sédiments des zones de *bajo*. Les quelques assemblages fournis ont, tout de même, mis à jour des assemblages caractéristiques de milieux ouverts ou quelques phytolithes de cultigènes pour la période classique, sur des zones actuellement recouvertes par la forêt. Si les phytolithes semblent indiquer et confirmer un impact des humains sur les zones escarpées, les données sont trop parcellaires pour être croisées avec celles-obtenues sur le *bajo* ou avec les connaissances modernes sur les pratiques agraires intrasites.

Compléter les connaissances régionales sur l'environnement maya

La bonne qualité des enregistrements sédimentaires pour la période Préclassique à Naachtun a permis d'aborder la question des premières installations mayas dans la forêt tropicale, avant la construction des aires urbaines. Cette période déterminante de l'histoire des basses-terres centrales est pourtant relativement moins étudiée que la période Classique, et souffre ainsi d'un manque de connaissances. Si la sédimentation perturbée des niveaux Classiques limite la construction d'un récit homme-milieu à Naachtun, les informations collectées ont amplement participé à la construction de l'histoire environnementale du site. Tout particulièrement, ce travail amène de précieuses données sur les pratiques agricoles au sein d'une zone de *bajo* au cours des 3500 dernières années. Il s'agit de connaissances précises et nouvelles sur l'évolution des pratiques en lien avec les changements environnementaux, et qui participent à compléter la carte mentale de l'utilisation des zones humides par les populations mayas des basses-terres centrales. Un modèle d'évolution des pratiques anthropiques peut ainsi être proposés pour le territoire de Naachtun au cours des 4 derniers millénaires :

Les premières traces d'ouverture dans le *bajo* à Naachtun ont été enregistrées au moins dès le Préclassique ancien et aux vues des enregistrement régionaux (Pohl et al., 1996 ; Carozza et al., 2007 ; Wahl et al., 2007 ; 2016) pourraient être datées de la fin de la période archaïque. Ces ouvertures multiples et décalées dans le temps ne permettent pas,

aujourd'hui, de conclure à une réponse à la variable climatique mais bien aux premières activités humaines dans le Petén (Rosenmeier et al., 2002 ; 2016 ; Wahl et al., 2014 ; 2016).

Au cours du Préclassique moyen, un large plan d'eau se met en place au moins sur la partie ouest et sud du *bajo*. Attesté par la sédimentation carbonatée et les assemblages de mollusques, ce petit lac pourrait être la réponse à une période climatique relativement plus humide à l'échelle des basses-terres au Préclassique moyen-récent (Rosenmeier, 2002 ; 2016 ; Douglas et al., 2016 ; Nooren et al., 2018).

Au Préclassique récent, les niveaux d'eau sont toujours pérennes. Toutefois, c'est dans ce contexte humide que sont suggérés dans un paléosol oxydé, les premières traces d'agriculture du maïs à Naachtun. Les données LiDAR et géochimiques nous ont permis de dresser l'hypothèse de la présence au Préclassique récent de canaux et champs surélevés en zone humide, dont ce paléosol pourrait faire partie. Cette phase agricole est contemporaine d'une tendance à l'ouverture de la végétation dans le *bajo*. A l'est du *bajo*, la présence en continu de palmiers et d'adventice nous amène à penser à la présence d'une forêt-jardin ou d'un verger. Ces premières traces agricoles sont également contemporaines des premières occupations attestées par du bâti à Naachtun (Hiquet et al., 2019).

La période Classique est moins bien enregistrée à Naachtun. La transition Préclassique-Classique marque, à Naachtun, l'augmentation importante de la population (Hiquet et al., 2019) alors que à l'échelle régionale, elle correspond au contraire à une période d'abandon de grands sites (Demarest, 2004) et à une importante sécheresse (Webster et al., 2007 ; Wahl et al., 2014 ; Douglas et al., 2016). Dans le *bajo*, cette période coïncide avec une diminution des indicateurs d'humidité et une épaisse sédimentation perturbée. Les phytolithes suggèrent, pour ces niveaux, une mosaïque de paysages, ouverts ou fermés, qui attestent d'une modification de l'usage de l'espace du *bajo*. Ces nouvelles utilisations des espaces de zones humides à la période classique ont été mises en avant dans les basses-terres centrales et au Belize (Pohl et al., 1996 ; Wahl et al., 2013 ; Walsh et al., 2014). Elles sont une preuve de l'adaptabilité des populations mayas aux changements de leur environnement. Enfin, les niveaux, du *bajo* ou de l'intrasite, interprétés ou datés des périodes Classique terminal ou Postclassique montrent tous des assemblages d'environnements fermés, correspondant à l'abandon du site et de la région par les sociétés mayas. Les indices de cette période charnière du site ne sont toutefois pas suffisants pour développer une interprétation paléoenvironnementale plus précise de cette autre période charnière.

Les apports majeurs de cette reconstitution historique concernent les relations des populations mayas de Naachtun avec sa zone humide, le *bajo*. Il a clairement été démontré que les mayas avaient transformé leurs écosystèmes en fonction de leur besoin. Pourtant, ces transformations sont éphémères, et sont adaptées à un contexte environnemental environnement. La période de transition Préclassique/Classique en est une démonstration avec le passage d'une agriculture en zone humide à un fonctionnement d'agriculture en

jachère, trouvant un autre moyen pour transporter la matière organique dans les sols. Les mayas sont ici illustrés comme une population consciente (des) et adaptée aux spécificités écologiques de leur environnement. L'image d'une population dans le déni de son action sur ses écosystèmes, si elle semble pertinente pour nos sociétés, ne semble pas appropriée pour les Mayas bien au contraire.

Perspectives

Cette étude a montré l'intérêt d'utiliser les phytolithes comme bioindicateurs des paléoenvironnements et des pratiques humaines passées. Elle a confirmé l'intérêt de développer une approche par assemblage, menée en parallèle d'une démarche multiproxy, qui permet de diminuer les biais taxonomiques des phytolithes. Si cette contribution archéobotanique a permis de proposer une histoire environnementale du site de Naachtun, il reste encore des points de recherches à développer afin d'améliorer nos interprétations. Une grande partie de ces améliorations concerne la résolution taxonomique des phytolithes et l'interprétation écologique des assemblages.

En effet, les morphotypes de Cyperaceae présentent une grande diversité morphologique qui pourrait être interprétée taxonomiquement (Ollendorf et al., 1992 ; Honaine et al., 2009). A Naachtun, les occurrences de ces morphotypes ont varié en fonction des phases d'ouverture ou d'humidité des écosystèmes. Certaines Cyperaceae pouvant se comporter comme des plantes rudérales ou de milieux humides, une amélioration de la taxonomie locale des phytolithes de Cyperaceae pourrait avoir un intérêt paléoenvironnemental certain.

Le même type de problème se retrouve chez les plantes ligneuses. Constitutives de la majorité des écosystèmes, leur production phytolithique est assez restreinte taxonomiquement. Le même genre de travail sur les ligneux, mené en Afrique par Runge (1999) ou Collura & Neumann (2017), pourrait être réalisé afin d'identifier et de diagnostiquer certains morphotypes simplement considérés comme des « Sclereid ».

Les niveaux fossiles ont livré de nombreux assemblages sans analogue moderne. Un effort d'échantillonnage dans des écosystèmes ciblés serait nécessaire pour une meilleure calibration. Ainsi, des zones ouvertes du Petén (savanes, lacs et étangs, autres *bajos*) ne sont pas répertoriées dans notre travail et pourraient permettre de mieux contraindre nos interprétations fossiles des formations végétales ouvertes. Ce besoin d'échantillonnage concerne également les zones agraires. Il pourrait être utile de reproduire et étendre le programme PAYAMA à d'autres pratiques agricoles comme les zones agroforestières ou les cultures en zone humide. Bien qu'ayant beaucoup évolué depuis le début de la période coloniale, leur étude permettrait une calibration des assemblages fossiles de cultures.

Enfin, concernant Naachtun et la période Classique, l'obtention de dates 14C supplémentaires pourrait permettre de mieux interpréter la partie supérieure des sondages étudiés. Également, l'étude de carottage de réservoir, ayant enregistré des niveaux classiques dilatés à l'extrême-ouest du *bajo*, pourrait permettre de compléter les enregistrements étudiés jusqu'ici et ainsi, améliorer nos interprétations socioenvironnementales pour cette période charnière de l'évolution culturelle des Mayas.

BIBLIOGRAPHIE

- A -

- Abramiuk, M.A., Dunham, P.S., Scott Cummings, L., Yost, C., Pesek, T.J.,** 2011. Linking Past and Present: A preliminary paleoethnobotanical study of Maya nutritional and medicinal plant use and sustainable cultivation in the Southern Maya Mountains, Belize. *Ethnobot. Res. App.* 9, 257. <https://doi.org/10.17348/era.9.0.257-273>
- Abrams, E.M., Rue, D.J.,** 1988. The causes and consequences of deforestation among the prehistoric Maya. *Hum Ecol* 16, 377–395. <https://doi.org/10.1007/BF00891649>
- Acuna-Soto, R., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Gomez Chavez, S., Cleaveland, M.K.,** 2005. Drought, epidemic disease, and the fall of classic period cultures in Mesoamerica (AD 750–950). Hemorrhagic fevers as a cause of massive population loss. *Medical Hypotheses* 65, 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2005.02.025>
- Aide, T.M., Rivera, E.,** 1998. Geographic patterns of genetic diversity in *Poulsenia armata* (Moraceae): implications for the theory of Pleistocene refugia and the importance of riparian forest. *Journal of Biogeography* 25, 695–705. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.2540695.x>
- Albert, R.M., Bamford, M.K., Cabanes, D.,** 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International, Linking African palaeoenvironments and modern environments: PAGES Workshop* 148, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.026>
- Albert, R.M., Bamford, M.K., Cabanes, D.,** 2009. Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains. *Quaternary International, Perspectives on Phytolith Research: 6th International Meeting on Phytolith Research* 193, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.008>
- Albuquerque de, E.S.B., Braga, J.M.A., Vieira, R.C.,** 2013. Morphological characterisation of silica phytoliths in Neotropical Marantaceae leaves. *Plant Syst Evol* 299, 1659–1670. <https://doi.org/10.1007/s00606-013-0823-9>
- Alchon, S.A.,** 2003. *A Pest in the Land: New World Epidemics in a Global Perspective*. UNM Press. https://books.google.fr/books?hl=en&lr=&id=YiHHnV08ebkC&oi=fnd&pg=PP7&dq=A+pest+in+the+land:+new+world+epidemics+in+a+global+perspective&ots=K_eLSk1fXz&sig=N5c1q6yplt95vbH8XI7sMiqafM#v=one-page&q=A%20pest%20in%20the%20land%3A%20new%20world%20epidemics%20in%20a%20global%20perspective&f=false
- Aleman, J., Leys, B., Apema, R., Bentaleb, I., Dubois, M.A., Lamba, B., Lebamba, J., Martin, C., Ngomanda, A., Truc, L., Yangakola, J.-M., Favier, C., Bremond, L.,** 2012. Reconstructing savanna tree cover from pollen, phytoliths and stable carbon isotopes. *J. Veg. Sci.* 23, 187–197. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01335.x>
- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Colin, F., Koud, J.-M.,** 1997a. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 677–682. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00001-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00001-X)
- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Lézine, A.-M., Vincens, A., Schwartz, D.,** 1997b. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 136, 213–229. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00089-8)

- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Mariotti, A., Soubies, F.,** 1999. Late Holocene Phytolith and Carbon-Isotope Record from a Latosol at Salitre, South-Central Brazil. *Quat. res.* 51, 187–194. <https://doi.org/10.1006/qres.1998.2027>
- Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V.,** 1980. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science* 208, 1095–1108. <https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- Andrews, E.W.,** 1987. A cache of early jades from Chacsinkin, Yucatán. *Mexicon* 9, 78-85. <https://www.jstor.org/stable/23759345?seq=1>
- Andrews, E.W., Hammond, N.,** 1990. Redefinition of the Swasey Phase at Cuello, Belize. *American Antiquity* 55, 570–584. <https://doi.org/10.2307/281287>
- Arponen, V.P.J., Dörfler, W., Feeser, I., Grimm, S., Groß, D., Hinz, M., Knitter, D., Müller-Scheeßel, N., Ott, K., Ribeiro, A.,** 2019. Environmental determinism and archaeology. Understanding and evaluating determinism in research design. *Archaeological Dialogues* 26, 1–9. <https://doi.org/10.1017/S1380203819000059>
- Atran, S., Lois, X., Ucan Ek, E.,** 2004. *Plants of the Petén Itza' Maya : Plantas de los maya itza' del Petén*, Memoirs. Museum of Anthropology, University of Michigan, Ann Arbor.
- Aubouin, J.,** 1977. Téthys, Atlantique et Pacifique : regard tectonique. *Bulletin de la Société géologique de France* 4, 170-187.
- Aubreville, A.,** 1974. Les origines des angiospermes (1). *Adansonia* 14, 5-27.
- Augustin, C.H.R.R., Coe, H.H.G., Chueng, K.F., Gomes, J.G.,** 2014. Analysis of geomorphic dynamics in ancient quartzite landscape using phytolith and carbon isotopes, Espinhaço Mountain Range, Minas Gerais, Brazil. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 20, 355–376. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10794>
- B -
- Babot, M. del P., Musaubach, M.G., Plos, A.,** 2017. An archaeobotanical perspective in the study of inflorescence phytoliths of wild grasses from arid and semi-arid environments of Argentina. *Quaternary International*, 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR) 434, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.02.045>
- Ball, T., Vrydaghs, L., Van Den Hauwe, I., Manwaring, J., De Langhe, E.,** 2006. Differentiating banana phytoliths: wild and edible *Musa acuminata* and *Musa balbisiana*. *Journal of Archaeological Science* 33, 1228–1236. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.12.010>
- Ball, T.B., Ehlers, R., Standing, M.D.,** 2009. Review of typologic and morphometric analysis of phytoliths produced by wheat and barley. *Breeding Science* 59, 505–512. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.59.505>
- Ball, T., Vrydaghs, L., Mercer, T., Pearce, M., Snyder, S., Lisztes-Szabó, Z., Pető, Á.,** 2017. A morphometric study of variance in articulated dendritic phytolith wave lobes within selected species of Triticeae and Aveneae. *Veget Hist Archaeobot* 26, 85–97. <https://doi.org/10.1007/s00334-015-0551-x>
- Bamford, M.K., Albert, R.M., Cabanes, D.,** 2006. Plio–Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International*, Linking African palaeoenvironments and modern environments: PAGES Workshop 148, 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.027>

- Barboni, D., Bremond, L.,** 2009. Phytoliths of East African grasses: An assessment of their environmental and taxonomic significance based on floristic data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 158, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.07.002>
- Barboni, D., Bonnefille, R., Alexandre, A., Meunier, J.D.,** 1999. Phytoliths as paleoenvironmental indicators, West Side Middle Awash Valley, Ethiopia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 152, 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00045-0)
- Barboni, D., Bremond, L., Bonnefille, R.,** 2007. Comparative study of modern phytolith assemblages from inter-tropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 246, 454–470. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.012>
- Baron, J.P.,** 2018. Ancient monetization: The case of Classic Maya textiles. *Journal of Anthropological Archaeology* 49, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2017.12.002>
- Bartlett, L.J., Williams, D.R., Prescott, G.W., Balmford, A., Green, R.E., Eriksson, A., Valdes, P.J., Singarayer, J.S., Manica, A.,** 2016. Robustness despite uncertainty: regional climate data reveal the dominant role of humans in explaining global extinctions of Late Quaternary megafauna. *Ecography* 39, 152–161. <https://doi.org/10.1111/ecog.01566>
- Bartoli, F., Souchier, B.,** 1978. Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Annales des sciences forestières* 35, 187-202. https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1978/03/AFS_0003-4312_1978_35_3_ART0002.pdf
- Bartoli, F., Wilding, L.P.,** 1980. Dissolution of Biogenic Opal as a Function of its Physical and Chemical Properties1. *Soil Science Society of America Journal* 44, 873. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040043x>
- Bartolome, J.W., Klukkert, S.E., Barry, W.J.,** 1986. Opal phytoliths as evidence for displacement of native californian grassland. *Madroño* 33, 217–222.
- Basch, P.F.,** 1959. Land mollusca of the Tikal National Park, Guatemala. *Occasional papers of the museum of zoology University of Michigan* 612, 1-15. <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/57049/OP612.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Beach, T.,** 1998. Soil catenas, tropical deforestation, and ancient and contemporary soil erosion in the Petén, Guatemala. *Physical Geography* 19, 378–405. <https://doi.org/10.1080/02723646.1998.10642657>
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N., Hageman, J., Lohse, J.,** 2002. Upland Agriculture in the Maya Lowlands: Ancient Maya Soil Conservation in Northwestern Belize*. *Geographical Review* 92, 372–397. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2002.tb00149.x>
- Beach, T., Dunning, N., Luzzadder-Beach, S., Scarborough, V.** 2003. Depression soils in the lowland tropics of Northwestern Belize: anthropogenic and natural origins. *Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface*, 139-174. https://www.researchgate.net/profile/Timothy_Beach2/publication/265082353_Depression_Soils_in_the_Lowland_Tropics_of_Northwestern_Belize_Anthropogenic_and_Natural_Origins/links/5441337d0cf2e6f0c0f6040a/Depression-Soils-in-the-Lowland-Tropics-of-Northwestern-Belize-Anthropogenic-and-Natural-Origins.pdf
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N., Cook, D.,** 2008. Human and natural impacts on fluvial and karst depressions of the Maya Lowlands. *Geomorphology* 101, 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.019>

- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N., Jones, J., Lohse, J., Guderjan, T., Bozarth, S., Millspaugh, S., Bhat-tacharya, T.**, 2009. A review of human and natural changes in Maya Lowland wetlands over the Holocene. *Quaternary Science Reviews* 28, 1710–1724. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.004>
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Terry, R., Dunning, N., Houston, S., Garrison, T.**, 2011. Carbon isotopic ratios of wetland and terrace soil sequences in the Maya Lowlands of Belize and Guatemala. *CATENA, Soils, Sediments, and Geoarchaeology* 85, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.014>
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Flood, J., Houston, S., Garrison, T., Román, E., Bozarth, S., Doyle, J., Lentz, D.L., Dunning, N.P., Scarborough, V.L.**, 2015. A neighborly view: water and environmental history of the El Zotz region. *Tikal: paleoecology of an ancient Maya city*. Cambridge University Press.
- Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Krause, S., Guderjan, T., Valdez, F., Fernandez-Diaz, J.C., Eshleman, S., Doyle, C.**, 2019. Ancient Maya wetland fields revealed under tropical forest canopy from laser scanning and multiproxy evidence. *PNAS* 116, 21469–21477. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910553116>
- Benvenuto, M.L., Fernández Honaine, M., Osterrieth, M., Coronato, A., Rabassa, J.**, 2013. Silicophytoliths in Holocene peatlands and fossil peat layers from Tierra del Fuego, Argentina, southernmost South America. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.11.025>
- Benvenuto, M.L., Honaine, M.F., Osterrieth, M.L., Morel, E.**, 2015. Differentiation of globular phytoliths in Are-caceae and other monocotyledons: morphological description for paleobotanical application. *Turkish Journal of Botany* 39, 341–353. <https://doi.org/10.3906/bot-1312-72>
- Bergeret, A.**, 2012. La quête d'autonomie des paysans mayas-q'eqchi'de Cahabón (Guatemala), 1944-2011. Trois perspectives sur les conflits de terre et les politiques de développement agricole. Thèse de doctorat, Université Sorbonne Nouvelle Paris 3.
- Black, S.L.**, 1990. The Carnegie Uaxactun Project and the Development of Maya Archaeology. *Ancient Mesoamerica* 1, 257–276. <https://doi.org/10.1017/S0956536100000298>
- Blackman, E.**, 1969. Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). *Can. J. Bot.* 47, 827–838. <https://doi.org/10.1139/b69-120>
- Blinnikov, M.S.**, 2005. Phytoliths in plants and soils of the interior Pacific Northwest, USA. *Review of Palaeobotany and Palynology* 135, 71–98. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2005.02.006>
- Blinnikov, M., Busacca, A., Whitlock, C.**, 2002. Reconstruction of the late Pleistocene grassland of the Columbia basin, Washington, USA, based on phytolith records in loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Reconstruction and Modeling of grass-dominated ecosystems* 177, 77–101. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00353-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00353-4)
- Boehm de Lameiras, B.**, 1986. Mesoamérica: sociedades y culturas. *Relaciones: estudios de historia y sociedad* 26, 13-22.
- Bonato, S.L., Salzano, F.M.**, 1997. Diversity and Age of the Four Major mtDNA Haplogroups, and Their Implications for the Peopling of the New World. *The American Journal of Human Genetics* 61, 1413–1423. <https://doi.org/10.1086/301629>
- Bonomo, M., de los Milagros Colobig, M., Passeggi, E., Zucol, A.F., Brea, M.**, 2011. Multidisciplinary studies at Cerro Tapera Vázquez site, Pre-Delta National Park, Argentina: The archaeological, sedimentological and

paleobotanical evidence. *Quaternary International, Multidisciplinary Studies in Southern South American Archaeology* 245, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.11.018>

Borba-Roschel, M., Alexandre, A., Varajão, A.F.D.C., Meunier, J.D., Varajão, C.A.C., Colin, F., 2006. Phytoliths as indicators of pedogenesis and paleoenvironmental changes in the Brazilian cerrado. *Journal of Geochemical Exploration, Extended Abstracts presented at the 7th Symp. on the Geochemistry of the Earth's Surface (GES-7)* 88, 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.032>

Boyd, M., 2005. Phytoliths as paleoenvironmental indicators in a dune field on the northern Great Plains. *Journal of Arid Environments* 61, 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.09.015>

Boyd, M., Surette, C., 2010. Northernmost Precontact Maize in North America. *American Antiquity* 75, 117–133. <https://doi.org/10.7183/0002-7316.75.1.117>

Boyd, M., Surette, C., Surette, J., Therriault, I., Hamilton, S., 2013. Holocene paleoecology of a wild rice (*Zizania* sp.) lake in Northwestern Ontario, Canada. *J Paleolimnol* 50, 365–377. <https://doi.org/10.1007/s10933-013-9731-9>

Boyd, W.E., Lentfer, C.J., Torrence, R., 1998. Phytolith analysis for a wet tropics environment: Methodological issues and implications for the archaeology of Garua island, West New Britain, Papua New Guinea. *Palynology* 22, 213–228. <https://doi.org/10.1080/01916122.1998.9989510>

Bozarth, S.R., 1987. Diagnostic Opal Phytoliths from Rinds of Selected Cucurbita Species. *American Antiquity* 52, 607–615. <https://doi.org/10.2307/281602>

Bozarth, S.R., 1990. Diagnostic Opal Phytoliths from Pods of Selected Varieties of Common Beans (*Phaseolus vulgaris*). *American Antiquity* 55, 98–104. <https://doi.org/10.2307/281495>

Bozarth, S.R., 1992. Classification of Opal Phytoliths Formed in Selected Dicotyledons Native to the Great Plains, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, Boston, MA, pp. 193–214. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_10

Bozarth, S., 1998. Maize (*Zea mays*) Cob Phytoliths From A Central Kansas Great Bend Aspect Archaeological Site. *Plains Anthropologist* 43, 279–286. <https://doi.org/10.1080/2052546.1998.11931908>

Bozarth, S.R., Guderjan, T.H., 2004. Biosilicate analysis of residue in Maya dedicatory cache vessels from Blue Creek, Belize. *Journal of Archaeological Science* 31, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.08.002>

Bozarth, S., Hansen, R.D., 2001. Estudios paleo-botánicos de Nakbé: evidencias preliminares de ambiente y cultivos en el preclásico. In *XIV simposio de investigaciones arqueológicas en Guatemala. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Ministerio de Cultura y Deportes, Instituto de Antropología e Historia, Asociación Tikal*, 419-436.

Bradbury, J.P., 1971. Paleolimnology of Lake Texcoco, Mexico. Evidence from Diatoms1. *Limnology and Oceanography* 16, 180–200. <https://doi.org/10.4319/lo.1971.16.2.0180>

Bradbury, J.P., Forester, R.M., Bryant, W.A., Covich, A.P., 1990. Paleolimnology of Laguna de Cocos, Albion Island, Rio Hondo, Belize. In *Ancient Maya wetland agriculture: excavations on Albion Island, northern Belize*. Westview Press Boulder, Colorado, 119-154.

Bravo-Cabrera, J.L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V., Gay-Garcia, C., 2017. Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atm* 30, 221–232. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.03>

- Bremond, L., Alexandre, A., Véla, E., Guiot, J.,** 2004. Advantages and disadvantages of phytolith analysis for the reconstruction of Mediterranean vegetation: an assessment based on modern phytolith, pollen and botanical data (Luberon, France). *Review of Palaeobotany and Palynology* 129, 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.02.002>
- Bremond, L., Alexandre, A., Hély, C., Guiot, J.,** 2005a. A phytolith index as a proxy of tree cover density in tropical areas: calibration with Leaf Area Index along a forest–savanna transect in southeastern Cameroon. *Global and Planetary Change* 45, 277–293. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.09.002>
- Bremond, L., Alexandre, A., Peyron, O., Guiot, J.,** 2005b. Grass water stress estimated from phytoliths in West Africa. *Journal of Biogeography* 32, 311–327. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01162.x>
- Bremond, L., Alexandre, A., Wooller, M.J., Hély, C., Williamson, D., Schäfer, P.A., Majule, A., Guiot, J.,** 2008. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Global and Planetary Change* 61, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.016>
- Brenner, M., Hodell, D.A., Rosenmeier, M.F., Curtis, J.H., Binford, M.W., Abbott, M.B.,** 2001. Chapter 6 - Abrupt Climate Change and Pre-Columbian Cultural Collapse, in: Markgraf, V. (Ed.), *Interhemispheric Climate Linkages*. Academic Press, San Diego, pp. 87–103. <https://doi.org/10.1016/B978-012472670-3/50009-4>
- Breton, A., Arnaud, J., & Arnaud, M.C.,** 1991. *Mayas: la passion des ancêtres, le désir de durer*. Autrement, Paris.
- Brocard, G., Anselmetti, F.S., Teyssier, C.,** 2016. Guatemala paleoseismicity: from Late Classic Maya collapse to recent fault creep. *Scientific Reports* 6, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep36976>
- Brush, C.F.,** 1965. Pox Pottery: Earliest Identified Mexican Ceramic. *Science* 149, 194–195. <https://doi.org/10.1126/science.149.3680.194>
- Buffetaut, E. & Le Loeuff, J.** (1998). *Les mondes disparus: atlas de la dérive des continents*. Editeurs Berg International, Paris.
- Burgos Debray, E.,** 1983. *Moi, Rigoberta Menchú: Une vie et une voix, la révolution au Guatemala*, 1. ed, Collection Témoins. Gallimard, Paris.
- Burney, D.A., Flannery, T.F.,** 2005. Fifty millennia of catastrophic extinctions after human contact. *Trends in Ecology & Evolution* 20, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.022>
- Burnham, R.J., & Graham, A.,** 1999. The history of neotropical vegetation: new developments and status. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 86, 546–589. <https://www.jstor.org/stable/2666185?seq=1>
- Burnham, R.J., Johnson, K.R.,** 2004. South American palaeobotany and the origins of neotropical rainforests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359, 1595–1610. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1531>
- Bush, M.B., Oliveira, P.E. de,** 2006. The rise and fall of the Refugial Hypothesis of Amazonian speciation: a paleoecological perspective. *Biota Neotropica* 6, 0–0. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032006000100002>
- Bush, M.B., Correa-metrio, A.Y., Hodell, D.A., Brenner, M., Anselmetti, F.S., Ariztegui, D., Mueller, A.D., Curtis, J.H., Grzesik, D.A., Burton, C., Gilli, A.,** 2009. Re-evaluation of Climate Change in Lowland Central America During the Last Glacial Maximum Using New Sediment Cores from Lake Petén Itzá, Guatemala, in: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. (Eds.), *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions: From the Last Glacial*

Maximum to the Holocene, Developments in Paleoenvironmental Research. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 113–128. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_5

- C -

Caballero, J., 1992. Maya homegardens: past, present and future. *Etnoecológica*, 1 : 35-54.

Cabanes, D., Shahack-Gross, R., 2015. Understanding Fossil Phytolith Preservation: The Role of Partial Dissolution in Paleoecology and Archaeology. *PLoS ONE* 10, e0125532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125532>

Cabanes, D., Weiner, S., Shahack-Gross, R., 2011. Stability of phytoliths in the archaeological record: a dissolution study of modern and fossil phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 38, 2480–2490. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.05.020>

Calegari, M.R., Madella, M., Vidal-Torrado, P., Otero, X.L., Macias, F., Osterrieth, M., 2013. Opal phytolith extraction in oxisols. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.11.005>

Calegari, M.R., Madella, M., Jr, A.A.B., Osterrieth, M.L., Lorente, F.L., Pessenda, L.C.R., 2015. Holocene Vegetation and Climate inferences from Phytoliths and Pollen from Lagoa do Macuco, North Coast of Espírito Santo State (Brazil). *Quaternary and Environmental Geosciences* 6. <https://doi.org/10.5380/abequa.v6i1.36426>

Calegari, M.R., Lopes Paisani, S.D., Cecchet, F.A., de Lima Ewald, P.L., Osterrieth, M.L., Paisani, J.C., Pontelli, M.E., 2017. Phytolith signature on the Araucarias Plateau – Vegetation change evidence in Late Quaternary (South Brasil). *Quaternary International, 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR)* 434, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.095>

Callen, E.O. (1965). Food habits of some pre-Columbian Mexican Indians. *Economic Botany* 19, 335-343. <https://www.jstor.org/stable/4252642>

Canuto, M.A., Estrada-Belli, F., Garrison, T.G., Houston, S.D., Acuña, M.J., Kováč, M., Marken, D., Nondédéo, P., Auld-Thomas, L., Castanet, C., Chatelain, D., Chiriboga, C.R., Drápela, T., Lieskovský, T., Tokovinine, A., Velasquez, A., Fernández-Díaz, J.C., Shrestha, R., 2018. Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala. *Science* 361, eaau0137. <https://doi.org/10.1126/science.aau0137>

Carfantan, J. C. (1985). Du système cordilleraire nord-américain au domaine caraïbe étude géologique du Mexique méridional. Thèse de doctorat, Université de Savoie.

Carnelli, A.L., Madella, M., Theurillat, J.-P., 2001. Biogenic Silica Production in Selected Alpine Plant Species and Plant Communities. *Ann Bot* 87, 425–434. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1355>

Carozza, J.-M., Galop, D., Metailie, J.-P., Vanniere, B., Bossuet, G., Monna, F., Lopez-Saez, J.A., Arnauld, M.-C., Breuil, V., Forne, M., Lemonnier, E., 2007. Landuse and soil degradation in the southern Maya lowlands, from Pre-Classic to Post-Classic times: The case of La Joyanca (Petén, Guatemala). *Geodinamica Acta* 20, 195–207. <https://doi.org/10.3166/ga.20.195-207>

Carrillo-Bastos, A., Islebe, G.A., Torrescano-Valle, N., González, N.E., 2010. Holocene vegetation and climate history of central Quintana Roo, Yucatán Peninsula, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology* 160, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2010.02.013>

- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G.A., Torrescano-Valle, N.,** 2012. Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán peninsula, Mexico. *Veget Hist Archaeobot* 21, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0355-1>
- Cary, L., Alexandre, A., Meunier, J.-D., Boeglin, J.-L., Braun, J.-J.,** 2005. Contribution of phytoliths to the suspended load of biogenic silica in the Nyong basin rivers (Cameroon). *Biogeochemistry* 74, 101–114. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-2945-1>
- Castanet, C.,** 2017. Operación IV.6 : Estudios del medio ambiente : Hidrología y sedimentología. In: Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018, Informe de la séptima temporada de campo 2016, 343-396.
- Castanet, C., Purdue, L.,** 2014. Operación IV.6 y IV.7: Estudios paleoambientales y geoarqueológicos. In: Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014, Informe de la cuarta temporada de campo 2013, 551-564.
- Castanet, C., Purdue, L., Lemonnier, E., Nondédéo, P.,** 2016. Dynamiques croisées des milieux et des sociétés dans les basses terres tropicales mayas : hydrosystème et agrosystème à Naachtun (Guatemala). *Les nouvelles de l'archéologie* 32–37. <https://doi.org/10.4000/nda.3275>
- Cerling, T.E., Harris, J.M., MacFadden, B.J., Leakey, M.G., Quade, J., Eisenmann, V., Ehleringer, J.R.,** 1997. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature* 389, 153–158. <https://doi.org/10.1038/38229>
- Chabot, Y.,** 2017. *Approche géomorphologique de la vallée de Deli et étude géoarchéologique du site historique de Kota Cina (Sumatra Nord, Indonésie)*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- Chabot, Y., Garnier, A., Geria, I.M.,** 2018. Phytolith analysis from the archaeological site of Kota Cina (North Sumatra, Indonesia). *Journal of Archaeological Science: Reports* 20, 483–501. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.04.033>
- Chandler-Ezell, K.C., Pearsall, D.M., Zeidler, J.A.,** 2006. Root and tuber phytoliths and starch grains document manioc *Manihot esculenta*, arrowroot *Maranta arundinacea* and Ilerén *Calathea* sp. at the real alto site Ecuador. *Econ Bot* 60, 103–120. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2006\)60\[103:RATPAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2006)60[103:RATPAS]2.0.CO;2)
- Charnay, D.,** 1896. Lettre de Fernand Cortes à Charles Quint sur la découverte et la conquête du Mexique. Librairie Hachette & Cie, Paris.
- Chase, A.F., & Chase, D.Z.,** 2004. Terminal Classic Status-Linked Ceramics and the Maya 'Collapse: 'De Facto Refuse at Caracol, Belize. In: Demarest, A.A., Rice, R.M., Rice, D. (Eds). *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition, And Transformation*. University Press of Colorado, 342.
- Chase, A.F., Chase, D.Z., Weishampel, J.F., Drake, J.B., Shrestha, R.L., Slatton, K.C., Awe, J.J., Carter, W.E.,** 2011. Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science* 38, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.018>
- Chase, M.W., Christenhusz, M.J.M., Fay, M.F., Byng, J.W., Judd, W.S., Soltis, D.E., Mabberley, D.J., Sennikov, A.N., Soltis, P.S., Stevens, P.F.,** 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Bot J Linn Soc* 181, 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Chen, S.T., Smith, S.Y.,** 2013. Phytolith variability in Zingiberales: A tool for the reconstruction of past tropical vegetation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 370, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.10.026>

- Cherif, M.**, 1994. Defense Responses Induced by Soluble Silicon in Cucumber Roots Infected by *Pythium* spp. *Phytopathology* 84, 236. <https://doi.org/10.1094/Phyto-84-236>
- Chimento, N.R., Agnolin, F.L., Novas, F.E.**, 2015. The bizarre 'metatherians' Groeberia and Patagonia, late surviving members of gondwanatherian mammals. *Historical Biology* 27, 603–623. <https://doi.org/10.1080/08912963.2014.903945>
- Chomsky, N.**, 2004. De la guerre comme politique étrangère des Etats-Unis. Marseille, Agone.
- Clark, J.E. & Doniz, R.**, 1994. Los olmecas en Mesoamérica. Equilibrista Citybank, Mexico.
- Clark, J.E., Cheetham, D.**, 2002. Mesoamerica's Tribal Foundations. In: Parkinson, W.A. (Eds). *The Archaeology of Tribal Societies*. Ann Arbor: International Monographs in Prehistory, 278–339.
- Coates, A.G., Collins, L.S., Aubry, M.-P., Berggren, W.A.**, 2004. The Geology of the Darien, Panama, and the late Miocene-Pliocene collision of the Panama arc with northwestern South America. *GSA Bulletin* 116, 1327–1344. <https://doi.org/10.1130/B25275.1>
- Cochet, Y.**, 2011. L'effondrement, catabolique ou catastrophique ? Institut Momentum, séminaire. <https://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2013/11/L%E2%80%99effondrement-catabolique-ou-catastrophique.pdf>
- Cochrane, M.**, 2010. *Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics*. Springer Science & Business Media.
- Cocker, K.M., Evans, D.E., Hodson, M.J.**, 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in planta mechanism? *Physiologia Plantarum* 104, 608–614. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040413.x>
- Cody, S., Richardson, J.E., Rull, V., Ellis, C., Pennington, R.T.**, 2010. The Great American Biotic Interchange revisited. *Ecography* 33, 326–332. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06327.x>
- Coe, H.H.G., Alexandre, A., Carvalho, C.N., Santos, G.M., da Silva, A.S., Sousa, L.O.F., Lepsch, I.F.**, 2013. Changes in Holocene tree cover density in Cabo Frio (Rio de Janeiro, Brazil): Evidence from soil phytolith assemblages. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.044>
- Coe, H.H.G., Macario, K., Gomes, J.G., Chueng, K.F., Oliveira, F., Gomes, P.R.S., Carvalho, C., Linares, R., Alves, E., Santos, G.M.**, 2014. Understanding Holocene variations in the vegetation of Sao Joao River basin, southeastern coast of Brazil, using phytolith and carbon isotopic analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Continental and Coastal Marine Records of Centennial to Millennial Changes in South American Climate since the Last Glacial Maximum* 415, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.01.009>
- Coe, H.H.G., Ramos, Y.B.M., dos Santos, C.P., Carvalho da Silva, A.L., Silvestre, C.P., Borrelli, N., de Oliveira Furtado de Sousa, L.**, 2017. Dynamics of production and accumulation of phytolith assemblages in the Restinga of Maricá, Rio De Janeiro, Brazil. *Quaternary International, 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR)* 434, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.071>
- Coe, M.D.**, 1965. Archaeological synthesis of southern Veracruz and Tabasco. In : Willey, G.R. (Eds). *Handbook of Middle American Indians*, 3(part 2), University of Texas Press, Austin.
- Coe, M.D., Diehl, R.A., Stuiver, M.**, 1967. Olmec Civilization, Veracruz, Mexico: Dating of the San Lorenzo Phase.

Science 155, 1399–1401. <https://doi.org/10.1126/science.155.3768.1399>

Coe, W.R., 1962. A Summary of Excavation and Research at Tikal, Guatemala: 1956-61. *American Antiquity* 27, 479–507. <https://doi.org/10.2307/277674>

Colinvaux, P.A., De Oliveira, P.E., Bush, M.B., 2000. Amazonian and neotropical plant communities on glacial time-scales: The failure of the aridity and refuge hypotheses. *Quaternary Science Reviews* 19, 141–169. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00059-1)

Collura, L.V., Neumann, K., 2017. Wood and bark phytoliths of West African woody plants. *Quaternary International*, 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR) 434, 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.070>

Colmenares, O.A., Teran, L., 1993. A biostratigraphic study of Paleogene sequences in southwestern Venezuela. *Palynology* 17, 67–89. <https://doi.org/10.1080/01916122.1993.9989419>

Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D., 2004. Domestication of Plants in Maya Lowlands. *Economic Botany* 58, S101–S110. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)58\[S101:DOPIML\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)58[S101:DOPIML]2.0.CO;2)

Conley, D.J., 2002. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle: global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 68-1-68–8. <https://doi.org/10.1029/2002GB001894>

Cook, S., 2016. *The forest of the Lacandon Maya: An ethnobotanical guide*. Springer, pp. 402.

Cooke, J., Leishman, M.R., 2011. Is plant ecology more siliceous than we realise? *Trends in Plant Science* 16, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.003>

Cordova, C.E., Johnson, W.C., Mandel, R.D., Palmer, M.W., 2011. Late Quaternary environmental change inferred from phytoliths and other soil-related proxies: Case studies from the central and southern Great Plains, USA. *CATENA, Soils, Sediments, and Geoarchaeology* 85, 87–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.015>

Correa, R.S.B., Moraes, J.C., Auad, A.M., Carvalho, G.A., 2005. Silicon and acibenzolar-S-methyl as resistance inducers in cucumber, against the whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype B. *Neotropical Entomology* 34, 429–433. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000300011>

Correa-Metrio, A., Bush, M.B., Cabrera, K.R., Sully, S., Brenner, M., Hodell, D.A., Escobar, J., Guilderson, T., 2012. Rapid climate change and no-analog vegetation in lowland Central America during the last 86,000 years. *Quaternary Science Reviews* 38, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.01.025>

Covich, A., 1976. Recent changes in molluscan species diversity of a large tropical lake (Lago de Peten, Guatemala)1: Molluscan species diversity. *Limnol. Oceanogr.* 21, 51–59. <https://doi.org/10.4319/lo.1976.21.1.0051>

Cox, C.B., 2000. Plate tectonics, seaways and climate in the historical biogeography of mammals. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz* 95, 509-516. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0074-0276200000400012&script=sci_arttext&tlng=es

Crosby, A.W., 1976. Virgin Soil Epidemics as a Factor in the Aboriginal Depopulation in America. *The William and Mary Quarterly* 33, 289. <https://doi.org/10.2307/1922166>

Crüger, H., 1857. Westindische Fragmente, 9 El Cauto. *Bot. Zeitung* 15, 281–292.

Cummings, L.S., 1992. Illustrated Phytoliths from Assorted Food Plants, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, Boston, MA, pp. 175–192. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_9

Cummings, L.S., Magennis, A., 1997. A phytolith and starch record of food and grit in Mayan human tooth tartar. *Estado Actual De Los Estudios De Fitolitos en Suelos Y Plantas. Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid*.

Curtis, J.H., Hodell, D.A., Brenner, M., 1996. Climate Variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the Past 3500 Years, and Implications for Maya Cultural Evolution. *Quaternary Research* 46, 37–47. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.0042>

Curtis, J.H., Brenner, M., Hodell, D.A., Balsler, R.A., Islebe, G.A., Hooghiemstra, H., 1998. A multi-proxy study of Holocene environmental change in the Maya Lowlands of Peten, Guatemala. *Journal of Paleolimnology* 19, 139–159. <https://doi.org/10.1023/A:1007968508262>

Cyr, H., McNamee, C., Amundson, L., Freeman, A., 2011. Reconstructing landscape and vegetation through multiple proxy indicators: A geoarchaeological examination of the St. Louis site, Saskatchewan, Canada. *Geoarchaeology* 26, 165–188. <https://doi.org/10.1002/gea.20345>

- D -

Dahlin, B.H., 1984. A colossus in Guatemala: the Preclassic Maya city of El Mirador. *Archaeology New York* 37, 18–25.

Darras, V., 2000. La Mésoamérique précolombienne. *Historiens et géographes, Association des professeurs d'histoire et de géographie*, 143–162.

Darwin, C., 1839. *Journal of Researches into the Natural History and Geology of the countries visited during the voyage round the world of H.M.S. Beagle, under the command of Captain Fitz Roy, R.N, from 1832 to 1836*. Henry Colburn, Great Malborough Street. <http://www.gutenberg.org/ebooks/3704>

Darwin, C., 1846. An account of the Fine Dust which often falls on Vessels in the Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Geological Society* 2, 26–30. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1846.002.01-02.09>

Davy, H., Sinclair, G., Bedford, J.R., 1815. *Elements of agricultural chemistry, in a course of lectures for the Board of agriculture*. Philadelphia, John Conrad & co. Philadelphia. <https://archive.org/details/elementsofagricu01davy/page/n3>

De Wever, P., David, B., Néraudeau, D., Broutin, J., 2010. *Paléobiosphère: nouveau traité de paléontologie*. Vuibert : Société géologique de France, Paris.

Demangeot, J., 1999. *Tropicalité. Géographie physique intertropicale*. Collection Armand Colin, Paris.

Demarest, A. A., 1989. The Olmec and the rise of civilization in eastern Mesoamerica. In: Sharer, R.J. & Grove, D.C. (Eds). *Regional perspectives of the Olmec*. Cambridge University Press, Cambridge.

Demarest, A.A., 2004. *Les Mayas : grandeur et chute d'une civilisation*. Tallandier, Paris.

Denevan, W.M., 1992. *The native population of the Americas in 1492*. University of Wisconsin Press.

Dengo, G., 1969. Problems of tectonic relations between Central America and the Caribbean. *Gulf Coast Association*

of Geological Societies Transactions 19, 311-320.

Denham, T.P., Haberle, S.G., Lentfer, C., Fullagar, R., Field, J., Therin, M., Porch, N., Winsborough, B., 2003. Origins of Agriculture at Kuk Swamp in the Highlands of New Guinea. *Science* 301, 189–193. <https://doi.org/10.1126/science.1085255>

Del Puerto, L., García-Rodríguez, F., Inda, H., Bracco, R., Castiñeira, C., Adams, J.B., 2006. Paleolimnological evidence of Holocene climatic changes in Lake Blanca, southern Uruguay. *J Paleolimnol* 36, 151–163. <https://doi.org/10.1007/s10933-006-0012-8>

Dercourt, J., Ricou, L.E., Vrielynck, B. (Eds.), 1993. *Atlas Tethys: Palaeoenvironmental Maps+ Explanatory Notes*. Editions Gauthier-Villars, Paris.

Derry, L.A., Kurtz, A.C., Ziegler, K., Chadwick, O.A., 2005. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. *Nature* 433, 728–731. <https://doi.org/10.1038/nature03299>

Diamond, J.M., 2000. *De l'inégalité parmi les sociétés: essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*. Gallimard, Paris.

Diamond, J.M., 2006. *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, Paris.

Dickau, R., Bruno, M.C., Iriarte, J., Prümers, H., Jaimes Betancourt, C., Holst, I., Mayle, F.E., 2012. Diversity of cultivars and other plant resources used at habitation sites in the Llanos de Mojos, Beni, Bolivia: evidence from macrobotanical remains, starch grains, and phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 39, 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.09.021>

Dickau, R., Whitney, B.S., Iriarte, J., Mayle, F.E., Soto, J.D., Metcalfe, P., Street-Perrott, F.A., Loader, N.J., Ficken, K.J., Killeen, T.J., 2013. Differentiation of neotropical ecosystems by modern soil phytolith assemblages and its implications for palaeoenvironmental and archaeological reconstructions. *Review of Palaeobotany and Palynology* 193, 15–37. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2013.01.004>

Diemont, S.A.W., Martin, J.F., Levy-Tacher, S.I., Nigh, R.B., Lopez, P.R., Golicher, J.D., 2006. Lacandon Maya forest management: Restoration of soil fertility using native tree species. *Ecological Engineering, The Growth of Ecological Engineering: The Fifth Annual Conference of the American Ecological Engineering Society* 28, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.10.012>

Dillehay, T.D., Ocampo, C., Saavedra, J., Sawakuchi, A.O., Vega, R.M., Pino, M., Collins, M.B., Cummings, L.S., Arregui, I., Villagran, X.S., Hartmann, G.A., Mella, M., González, A., Dix, G., 2015. New Archaeological Evidence for an Early Human Presence at Monte Verde, Chile. *PLOS ONE* 10, e0141923. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141923>

Dillon, R.T., 2000. *The ecology of freshwater molluscs*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.

Djindjian, F., 2010. Le rôle de l'archéologue dans la société contemporaine. *Diogene* 229-230, 78–90. <https://www.cairn.info/revue-diogene-2010-1-page-78.htm>

Dorweiler, J.E., Doebley, J., 1997. Developmental analysis of Teosinte glume architecture1: a key locus in the evolution of maize (Poaceae). *American Journal of Botany* 84, 1313–1322. <https://doi.org/10.2307/2446130>

- Douglas, P.M.J., Pagani, M., Canuto, M.A., Brenner, M., Hodell, D.A., Eglinton, T.I., Curtis, J.H.,** 2015. Drought, agricultural adaptation, and sociopolitical collapse in the Maya Lowlands. *PNAS* 112, 5607–5612. <https://doi.org/10.1073/pnas.1419133112>
- Douglas, P.M.J., Demarest, A.A., Brenner, M., Canuto, M.A.,** 2016. Impacts of Climate Change on the Collapse of Lowland Maya Civilization. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 44, 613–645. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012512>
- Dourson, D.C., Caldwell, R.S.,** 2018. Land snails of Belize Central America: a chronicle of remarkable diversity and function. Goatslug Publications.
- Doyle, J.A.,** 1998. Molecules, Morphology, Fossils, and the Relationship of Angiosperms and Gnetales. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 9, 448–462. <https://doi.org/10.1006/mpev.1998.0506>
- Doyle, K., & Kornbluh, P.,** 1997. CIA and Assassinations: the Guatemala 1954 documents. National Security Archive.
- Duarte, L., & Japiassú, A.M.,** 1971. Vegetais meso e cenozóicos do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 43, 433-443.
- Dumond, D.E.,** 1961. Swidden Agriculture and the Rise of Maya Civilization. *Southwestern Journal of Anthropology* 17, 301–316. <https://doi.org/10.1086/soutjanth.17.4.3628942>
- Dunning, N.P., Luzzadder-Beach, S., Beach, T., Jones, J.G., Scarborough, V., Culbert, T.P.,** 2002. Arising from the Bajos: The Evolution of a Neotropical Landscape and the Rise of Maya Civilization. *Annals of the Association of American Geographers* 92, 267–283. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.00290>
- Dunning, N., Beach, T., Farrell, P., Luzzadder-Beach, S.,** 1998. Prehispanic Agrosystems and Adaptive Regions in the Maya Lowlands. *Culture & Agriculture* 20, 87–101. <https://doi.org/10.1525/cag.1998.20.2-3.87>
- Dunning, N.P., Beach, T.P., Luzzadder-Beach, S.,** 2012. Kax and kol: Collapse and resilience in lowland Maya civilization. *PNAS* 109, 3652–3657. <https://doi.org/10.1073/pnas.1114838109>
- Dunning, N.P., Lentz, D.L., Scarborough, V.L.,** 2015. Tikal land, water, and forest : an introduction. *Tikal: paleoecology of an ancient Maya city*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dunning, N.P., Griffin, R.E., Jones, J.G., Terry, R.E., Larsen, Z., Carr, C.,** 2015b. Life on the edge: Tikal in a Bajo landscape. *Tikal: Paleoecology of an ancient Maya city*. Cambridge University Press.
- Dunning, N.P., Anaya Hernández, A., Beach, T., Carr, C., Griffin, R., Jones, J.G., Lentz, D.L., Luzzadder-Beach, S., Reese-Taylor, K., Šprajc, I.,** 2019. Margin for error: Anthropogenic geomorphology of Bajo edges in the Maya Lowlands. *Geomorphology* 331, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.002>
- Durán-Quesada, A.M., Gimeno, L., Amador, J.A., Nieto, R.,** 2010. Moisture sources for Central America: Identification of moisture sources using a Lagrangian analysis technique. *J. Geophys. Res.* 115, D05103. <https://doi.org/10.1029/2009JD012455>
- Dussol L (2017)** *Feux et forêts mayas. Usages et gestion des combustibles ligneux dans les Basses Terres centrales mayas à la période Classique: le cas du site de Naachtun, Petén, Guatemala: approche anthracologique*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne.

Dussol, L., Elliott, M., Michelet, D., Nondédéo, P., 2017. Ancient Maya silviculture of breadnut (*Brosimum alicastrum* Sw.) and sapodilla (*Manilkara zapota* (L.) P. Royen) at Naachtun (Guatemala): A reconstruction based on charcoal analysis. *Quaternary International, Anthracology: Local to Global Significance of Charcoal Science - Part I* 457, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.10.014>

Dussol, L., Sion, J., Nondédéo, P., 2019. Late fire ceremonies and abandonment behaviors at the Classic Maya city of Naachtun, Guatemala. *Journal of Anthropological Archaeology* 56, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2019.101099>

- E -

Ehrenberg, C.G., 1843. *Verbreitung und Einfluss des mikroskopischen Lebens in Süd- und Nord-Amerika : ein Vortrag.* Berlin : Königliche Akademie der Wissenschaften. <https://archive.org/details/b22474833>

Ehrlich P.R., Ehrlich A.H., 2013. Can a collapse of global civilization be avoided? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280, 20122845. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2845>

Eichhorn, B., Neumann, K., Garnier, A., 2010. Seed phytoliths in West African Commelinaceae and their potential for palaeoecological studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 298, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.004>

Elbaum, R., Weiner, S., Albert, R.M., Elbaum, M., 2003. Detection of Burning of Plant Materials in the Archaeological Record by Changes in the Refractive Indices of Siliceous Phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 30, 217–226. <https://doi.org/10.1006/jasc.2002.0828>

Elliott, M., Fisher, C.T., Nelson, B.A., Garza, R.S.M., Collins, S.K., Pearsall, D.M., 2010. Climate, agriculture, and cycles of human occupation over the last 4000 yr in southern Zacatecas, Mexico. *Quaternary Research* 74, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.04.001>

Eneji, A.E., Inanaga, S., Muranaka, S., Li, J., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., 2008. Growth and Nutrient Use in Four Grasses Under Drought Stress as Mediated by Silicon Fertilizers. *Journal of Plant Nutrition* 31, 355–365. <https://doi.org/10.1080/01904160801894913>

Enjalbert, H., 1967. Les montagnes calcaires du Mexique et du Guatemala. *Annales de géographie* 76, 29–59. <https://doi.org/10.3406/geo.1967.14923>

Erhart, H., 1963. Sur le cycle de la silice hydratée dans la biosphère. *CR Acad. Sci.* 256, 3731-3734.

Ernst, W.H.O., Vis, R.D., Piccolo, F., 1995. Silicon in Developing Nuts of the Sedge *Schoenus nigricans*. *Journal of Plant Physiology* 146, 481–488. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)82012-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)82012-2)

Erra, G., Osterrieth, M., Zurita, A.E., Francia, A., Carlini, A.A., 2013. Palaeoenvironment of the Toropí Formation (Upper Pleistocene), Corrientes province (Mesopotamian region, Argentina): A phytolith approach. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.08.2110>

Estrada Belli, F., 2011. *The first Maya civilization: ritual and power before the classic period.* Routledge, London ; New York.

Evans, J.G., 1972. *Land snails in archaeology: with special reference to the British Isles,* Studies in archaeological science. Seminar Press, London, New York.

Ezell, K.C., Pearsall, D.M., Zeidler, J.A., 2006. Root and tuber phytoliths and starch grains document manioc (*Manihot esculenta*), arrowroot (*Maranta arundinacea*) and Ilerén (*Calathea* sp.) at the real alto site Ecuador. *Econ Bot* 60, 103–120. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2006\)60\[103:RATPAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2006)60[103:RATPAS]2.0.CO;2)

- F -

Fahmy, A.G., 2008. Diversity of lobate phytoliths in grass leaves from the Sahel region, West Tropical Africa: Tribe Paniceae. *Plant Syst Evol* 270, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s00606-007-0597-z>

Farmer, V.C., 2005. Forest vegetation does recycle substantial amounts of silicon from and back to the soil solution with phytoliths as an intermediate phase, contrary to recent reports. *European Journal of Soil Science* 56, 271–272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00695.x>

Fash, W.L., Andrews, E.W., & Manahan, T.K., 2004. Political decentralization, dynastic collapse, and the Early Postclassic in the urban center of Copan, Honduras. In: *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition, And Transformation*. University Press of Colorado, 677.

Fedick, S.L., 2010. The Maya Forest: Destroyed or cultivated by the ancient Maya? *PNAS* 107, 953–954. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913578107>

Fenwick, R.S.H., Lentfer, C.J., Weisler, M.I., 2011. Palm reading: a pilot study to discriminate phytoliths of four *Areceaceae* (Palmae) taxa. *Journal of Archaeological Science* 38, 2190–2199. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.03.016>

Ferguson, B.G., Vandermeer, J., Morales, H., Griffith, D.M., 2003. Post-Agricultural Succession in El Petén, Guatemala. *Conservation Biology* 17, 818–828. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.01265.x>

Fiedel, S., Haynes, G., 2004. A premature burial: comments on Grayson and Meltzer's "Requiem for overkill." *Journal of Archaeological Science* 31, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.06.004>

Fischer, P., 1877. *Etudes sur les mollusques terrestres et fluviatiles du Mexique et du Guatemala*. Mission scientifique au Mexique et dans l'Amérique Centrale. Paris Imprimerie nationale.

Fisher, C., 2014. The role of infield agriculture in Maya cities. *Journal of Anthropological Archaeology* 36, 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2014.10.001>

Fishkis, O., Ingwersen, J., Lamers, M., Denysenko, D., Streck, T., 2010. Phytolith transport in soil: A field study using fluorescent labelling. *Geoderma* 157, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.012>

Flannery, V.L., 1987. *Guila Naquitz: Archaic Foraging and Early Agriculture in Oaxaca, Mexico*. Routledge.

Folan, W.J., 1992. Calakmul, Campeche: A centralized urban administrative center in the northern Petén. *World Archaeology* 24, 158–168. <https://doi.org/10.1080/00438243.1992.9980199>

Folan, W.J., Faust, B., Lutz, W., Gunn, J.D., (2000). Social and environmental factors in the Classic Maya collapse. In *Population, Development and Environment on the Yucatán Peninsula: From Ancient Maya to 2030*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Folger, D.W., Burckle, L.H., Heezen, B.C., 1967. Opal Phytoliths in a North Atlantic Dust Fall. *Science* 155, 1243–1244. <https://doi.org/10.1126/science.155.3767.1243>

- Ford, A.**, 2008. Dominant Plants Of The Maya Forest And Gardens Of El Pilar: Implications For Paleoenvironmental Reconstructions. *etbi* 28, 179–199. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-28.2.179>
- Ford, A., Nigh, R.**, 2009. Origins of the Maya Forest Garden: Maya Resource Management. *etbi* 29, 213–236. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-29.2.213>
- Fourcade, E., Méndez, J., Azéma, J., Bellier, J.-P., Cros, P., Michaud, F., Carballo, M., Villagrán, J.C.**, 1994. Dating of the Settling and Drowning of the Carbonate Platform, and of the Overthrusting of the Ophiolites on the Maya Block during the Mesozoic (Guatemala). *nos* 30, 33–43. <https://doi.org/10.1127/nos/30/1994/33>
- Frakes, L.A., Francis, J.E., Syktus, J.I.**, 1992. *Climate Models of the Phanerozoic*. Cambridge University Press Cambridge.
- Franceschi, V.R., Nakata, P.A.**, 2005. Calcium oxalate in plants : Formation and Function. *Annual Review of Plant Biology* 56, 41–71. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>
- Frayse, F.**, 2007. *Cycle biogéochimique du silicium dans les environnements superficiels continentaux: Impact des plantes terrestres*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Frayse, F., Pokrovsky, O.S., Schott, J., Meunier, J.-D.**, 2009. Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology* 258, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.003>
- Fredlund, G.G., Tieszen, L.T.**, 1994. Modern Phytolith Assemblages from the North American Great Plains. *Journal of Biogeography* 21, 321–335. <https://doi.org/10.2307/2845533>
- Fredlund, G.G., Tieszen, L.L.**, 1997. Phytolith and Carbon Isotope Evidence for Late Quaternary Vegetation and Climate Change in the Southern Black Hills, South Dakota. *Quaternary Research* 47, 206–217. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1862>
- Fredlund, G.G., Bousman, C.B., Boyd, D.K.**, 1998. The Holocene Phytolith Record from Morgan Playa in the Rolling Plains of Texas. *Plains Anthropologist* 43, 187–200. <https://doi.org/10.1080/2052546.1998.11931899>
- Fritz, G.J.**, 1994. Are the First American Farmers Getting Younger? *Current Anthropology* 35, 305–309. <https://doi.org/10.1086/204280>
- Frost, T.M.**, 2001. Freshwater Sponges, in: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M., Bradley, R.S., Alverson, K. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators, Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 253–263. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_12
- G -
- Galeano, E.**, 2016. *El cazador de historias*. Siglo XXI, Espana.
- Gallego, L., Distel, R.A.**, 2004. Phytolith Assemblages in Grasses Native to Central Argentina. *Ann Bot* 94, 865–874. <https://doi.org/10.1093/aob/mch214>
- Galop, D., Carozza, J.-M., Lopez-Saez, J.A., Vannièrè, B., Bossuet, G., Perez, M.V., Métaillié, J.-P.**, 2004. Historia del medio ambiente en la larga duracion y ocupacion del espacio en la region de la Joyanca, noroeste de Petén, Guatemala : primeros resultados. XVII Simposio de Investigaciones Arqueologicas en Guatemala, Museo nacional de arqueologia e etnologia, p. 551.

García-Díaz, J. L. (2004). Etude géologique de la Sierra Madre del Sur aux environs de Chilpancingo et d'Olinalá, Gro.: Une contribution à la connaissance de l'évolution géodynamique de la marge pacifique du Mexique depuis le Jurassique. Thèse de doctorat, Université de Savoie.

Garnier, A., 2013. *La dynamique d'un système fluvial et de ses zones humides en Afrique soudano-sahélienne au cours de l'Holocène. Approches géomorphologique et biogéographique. L'exemple du Yamé au Mali*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.

Garnier, A., Neumann, K., Eichhorn, B., Lespez, L., 2013. Phytolith taphonomy in the middle- to late-Holocene fluvial sediments of Ounjougou (Mali, West Africa). *The Holocene* 23, 416–431.
<https://doi.org/10.1177/0959683612463102>

Gause, E., 2014. A Critique: Jared Diamond's Collapse Put In Perspective. *Papers from the Institute of Archaeology*, 24(1), p.Art. 16. DOI: <http://doi.org/10.5334/pia.467>

Geis, J.W., 1973. Biogenic silica in selected species of deciduous angiosperms. *Soil Science* 116, 113.

Germeraad, J.H., Hopping, C.A., Muller, J., 1968. Palynology of tertiary sediments from tropical areas. Review of Palaeobotany and Palynology, *Palynology of Tertiary Sediments from Tropical Areas* 6, 189–348.
[https://doi.org/10.1016/0034-6667\(68\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0034-6667(68)90051-1)

Giannini, A., Cane, M.A., Kushnir, Y., 2001. Interdecadal Changes in the ENSO Teleconnection to the Caribbean Region and the North Atlantic Oscillation. *J. Climate* 14, 2867–2879. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2867:ICITET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2867:ICITET>2.0.CO;2)

Gil, M.J., Carbot-Chanona, G., García, E.N., 2017. Moluscos gasterópodos terrestres y dulceacuícolas del área focal Ixcán, Chiapas, México. *Lacandonia* 4, 29-36. [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31266086/Avendano_Carbot_Naranjo_2010_-_Gasteropodos_terrestres_y_dulce.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMoluscos_gasteropodos_terrestres_y_dulce.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200103%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200103T030507Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=e1498e7a16bbdb9db2ec99722703163f8acafdfc673ca89f0993678ea4cfc8a3](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31266086/Avendano_Carbot_Naranjo_2010_-_Gasteropodos_terrestres_y_dulceacuicolas_de_Ixcan_Chiapas.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMoluscos_gasteropodos_terrestres_y_dulce.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200103%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200103T030507Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=e1498e7a16bbdb9db2ec99722703163f8acafdfc673ca89f0993678ea4cfc8a3)

Gleijeses, P., 1992. *Shattered hope: the Guatemalan revolution and the United States, 1944-1954*. Princeton University Press.

Golokhvast, K.S., Seryodkin, I.V., Chaika, V.V., Zakharenko, A.M., Pamirsky, I.E., 2014. Phytoliths in Taxonomy of Phylogenetic Domains of Plants [WWW Document]. *BioMed Research International*.
<https://doi.org/10.1155/2014/648326>

Goman, M., Byrne, R., 1998. A 5000-year record of agriculture and tropical forest clearance in the Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *The Holocene* 8, 83–89. <https://doi.org/10.1191/095968398670396093>

Gonzalez, S., Huddart, D., Israde -Alcántara, I., Domínguez-Vázquez, G., Bischoff, J., Felstead, N., 2015. Paleoindian sites from the Basin of Mexico: Evidence from stratigraphy, tephrochronology and dating. *Quaternary International* 363, 4–19. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.015>

Goodrich, C., Van der Schalie, H., 1937. *Mollusca of Petén and north Alta Vera Paz, Guatemala*. University of Michigan, miscellaneous publication, 34. <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/56279/MP034.pdf;sequence=1>

- Graham, A.**, 1964. Origin and Evolution of the Biota of Southeastern North America: Evidence from the Fossil Plant Record. *Evolution* 18, 571–585. <https://doi.org/10.2307/2406211>
- Graham, A.**, 1995. Development of affinities between Mexican/Central American and northern South American lowland and lower montane vegetation during the Tertiary. In *Biodiversity and conservation of neotropical montane forests*. The New York Botanical Garden, New York.
- Graham, A.**, 1999. Studies in Neotropical paleobotany. XIII. An Oligo-Miocene palynoflora from Simojovel (Chiapas, Mexico). *American Journal of Botany* 86, 17–31. <https://doi.org/10.2307/2656951>
- Granville, J.-J. de**, 1988. Phytogeographical Characteristics of the Guianan Forests. *TAXON* 37, 578–594. <https://doi.org/10.2307/1221101>
- Grayson, D.K.**, 2001. The Archaeological Record of Human Impacts on Animal Populations. *Journal of World Prehistory* 15, 1–68. <https://doi.org/10.1023/A:1011165119141>
- Grego, J., Angyal, D., Beltrán, L.A.L.**, 2019. First record of subterranean freshwater gastropods (Mollusca, Gastropoda, Cochliopidae) from the cenotes of Yucatán state. *SB* 29, 79–88. <https://doi.org/10.3897/subtbiol.29.32779>
- Grimm, A.M., Barros, V.R., Doyle, M.E.**, 2000. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *J. Climate* 13, 35–58. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- Gu, Y., Pearsall, D.M., Xie, S., Yu, J.**, 2008. Vegetation and fire history of a Chinese site in southern tropical Xishuangbanna derived from phytolith and charcoal records from Holocene sediments. *Journal of Biogeography* 35, 325–341. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01763.x>
- Gu, Y., Zhao, Z., Pearsall, D.M.**, 2013. Phytolith morphology research on wild and domesticated rice species in East Asia. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.013>
- Gu, Y., Liu, H., Wang, H., Li, R., Yu, J.**, 2016. Phytoliths as a method of identification for three genera of woody bamboos (Bambusoideae) in tropical southwest China. *Journal of Archaeological Science* 68, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.08.003>
- Guevara de la Serna, E.** (2002). *Che Guevara : Second Voyage à travers l'Amérique latine (1953-1956)*. Fayard, Milles et une nuit, Paris.
- H -
- Halperin, C.T.**, 2017. Ancient cosmopolitanism: Feminism and the rethinking of Maya inter-regional interactions during the Late Classic to Postclassic periods (ca. 600–1521 CE). *Journal of Social Archaeology* 17, 349–375. <https://doi.org/10.1177/1469605317730628>
- Hammond, N., Pring, D., Berger, R., Switsur, V.R., Ward, A.P.**, 1976. Radiocarbon chronology for early Maya occupation at Cuello, Belize. *Nature* 260, 579–581. <https://doi.org/10.1038/260579a0>
- Handy, J.**, 1994. *Revolution in the countryside: rural conflict and agrarian reform in Guatemala, 1944-1954*. University of North Carolina Press, Chapel Hill.

- Hansen, R.**, 1984. Excavations on structure 34 and the Tigre area, El Mirador, Peten, Guatemala: a new look at the preclassic lowland Maya. Thèse de doctorat, Brigham Young University.
- Hansen, R.D.**, 1991. The road to Nakbe. *Natural History* 100, 8-12.
- Hansen, R.D.**, 2005. Perspectives on Olmec–Maya Interaction in the Middle Formative Period. In *New Perspectives on Formative Mesoamerican Cultures*. Oxford: Archaeopress.
- Hansen, R.D.**, 2012. Kingship in the cradle of Maya civilization: the Mirador Basin. In *Fanning the sacred flame: Mesoamerican studies in the honor of HB Nicholson*, University Press of Colorado.
- Hansen, R.D., Bozarth, S., Jacob, J., Wahl, D., Schreiner, T.**, 2002. Climatic and environmental variability in the rise of Maya civilization: A preliminary perspective from northern Peten. *Ancient Mesoamerica* 13, 273–295. <https://doi.org/10.1017/S0956536102132093>
- Haq, B.U., Hardenbol, J., Vail, P.R.**, 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic. *Science* 235, 1156–1167. <https://doi.org/10.1126/science.235.4793.1156>
- Harling, G.**, 1979. The vegetation types of Ecuador—a brief survey. In *Tropical Botany*. Academic Press.
- Harrison, F.W.**, 1988. Utilization of freshwater sponges in paleolimnological studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 62, 387–397. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(88\)90063-6](https://doi.org/10.1016/0031-0182(88)90063-6)
- Hartley, S.E., DeGabriel, J.L.**, 2016. The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses. *Functional Ecology* 30, 1311–1322. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12706>
- Hastenrath, S.**, 1976. Variations in Low-Latitude Circulation and Extreme Climatic Events in the Tropical Americas. *J. Atmos. Sci.* 33, 202–215. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<0202:VILLCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0202:VILLCA>2.0.CO;2)
- Hastenrath, S.**, 1984. Interannual Variability and Annual Cycle: Mechanisms of Circulation and Climate in the Tropical Atlantic Sector. *Mon. Wea. Rev.* 112, 1097–1107. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1097:IVAACM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1097:IVAACM>2.0.CO;2)
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Röhl, U.**, 2001. Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene. *Science* 293, 1304–1308. <https://doi.org/10.1126/science.1059725>
- Haug, G.H., Günther, D., Peterson, L.C., Sigman, D.M., Hughen, K.A., Aeschlimann, B.**, 2003. Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science* 299, 1731–1735. <https://doi.org/10.1126/science.1080444>
- Haynes, G.**, 2018. The Evidence for Human Agency in the Late Pleistocene Megafaunal Extinctions, in: Dellasala, D.A., Goldstein, M.I. (Eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene*. Elsevier, Oxford, pp. 219–226. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.10012-6>
- Healy, P.F., Lambert, J.D.H., Arnason, J.T., Hebda, R.J.**, 1983. Caracol, Belize: Evidence of Ancient Maya Agricultural Terraces. *Journal of Field Archaeology* 10, 397–410. <https://doi.org/10.1179/009346983791504200>
- Heine, G., Tikum, G., Horst, W.J.**, 2007. The effect of silicon on the infection by and spread of *Pythium aphanidermatum* in single roots of tomato and bitter melon. *J Exp Bot* 58, 569–577. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl232>
- Helms, M.W.**, 1975. *Middle America: a culture history of heartland and frontiers*. University Press of America.

- Hennig, W.**, 1966. Phylogenetic Systematics. *Annu. Rev. Entomol.* 10, 97–116. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.10.010165.000525>
- Hickey, D.**, 2013. Les Mayas, victimes de l'histoire dans la guerre civile du Guatemala, 1954-1996. *Amerika. Mémoires, identités, territoires.* <https://doi.org/10.4000/amerika.3880>
- Hidalgo, H.G., Durán-quesada, A.M., Amador, J.A., Alfaro, E.J.**, 2015. The caribbean low-level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra-americas sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 97, 41–59. <https://doi.org/10.1111/geoa.12085>
- Hildebrand, A.R., Penfield, G.T., Kring, D.A., Pilkington, M., Z, A.C., Jacobsen, S.B., Boynton, W.V.**, 1991. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology* 19, 867–871. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0867:CCAPCT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0867:CCAPCT>2.3.CO;2)
- Hiquet, J., Lemonnier, E., Cotom-Nimatuj, J.**, 2016. Time and space in Naachtun: Studying the chronological sequence, settlement and land use patterns. 81st SAA Annual Meeting, Orlando.
- Hiquet, J.**, 2019. Essor Monumental et dynamiques des populations : le cas de la cité maya de Naachtun (Guatemala) au Classique ancien (150-550 apr. J.-C.). Thèse de Doctorat, Université Paris I Panthéon Sorbonne.
- Hodder, I., Hutson, S.**, 2003. Reading the past: current approaches to interpretation in archaeology. Cambridge University Press.
- Hodell, D.A., Curtis, J.H., Brenner, M.**, 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature* 375, 391–394. <https://doi.org/10.1038/375391a0>
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Medina-González, R., Can, E.I.-C., Albornaz-Pat, A., Guilderson, T.P.**, 2005. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* 63, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.11.004>
- Hodson, M.J., Sangster, A.G.**, 1988. Silica deposition in the inflorescence bracts of wheat (*Triticum aestivum*). I. Scanning electron microscopy and light microscopy. *Can. J. Bot.* 66, 829–838. <https://doi.org/10.1139/b88-121>
- Hochuli, P.A., Feist-Burkhardt, S.**, 2013. Angiosperm-like pollen and Afropollis from the Middle Triassic (Anisian) of the Germanic Basin (Northern Switzerland). *Front. Plant Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00344>
- Honaine, M.F., Zucol, A.F., Osterrieth, M.L.**, 2006. Phytolith Assemblages and Systematic Associations in Grassland Species of the South-Eastern Pampean Plains, Argentina. *Ann Bot* 98, 1155–1165. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl207>
- Honaine, M.F., Zucol, A.F., Osterrieth, M.L.**, 2009. Phytolith analysis of Cyperaceae from the Pampean region, Argentina. *Aust. J. Bot.* 57, 512–523. <https://doi.org/10.1071/BT09041>
- Hooghiemstra, H., van der Hammen, T.**, 1998. Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: the forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth-Science Reviews* 44, 147–183. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(98\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(98)00027-0)
- Hoopes, J.W.**, 1994. Ford revisited: A critical review of the chronology and relationships of the earliest ceramic complexes in the New World, 6000-1500 B.C. *J World Prehist* 8, 1–49. <https://doi.org/10.1007/BF02221836>

Hoorn, C., Wesselingh, F.P., Steege, H. ter, Bermudez, M.A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C.L., Figueiredo, J.P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F.R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stalder, T., Särkinen, T., Antonelli, A., 2010. Amazonia Through Time: Andean Uplift, Climate Change, Landscape Evolution, and Biodiversity. *Science* 330, 927–931. <https://doi.org/10.1126/science.1194585>

Horrell, M.A., 1991. Phytogeography and paleoclimatic interpretation of the Maestrichtian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Fossils, Models and Climate* 86, 87–138. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90007-E](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90007-E)

Horrocks, M., Irwin, G.J., McGlone, M.S., Nichol, S.L., Williams, L.J., 2003. Pollen, Phytoliths and Diatoms in Prehistoric Coprolites from Kohika, Bay of Plenty, New Zealand. *Journal of Archaeological Science* 30, 13–20. <https://doi.org/10.1006/jasc.2001.0714>

Huan, X., Lu, H., Wang, C., Tang, X., Zuo, X., Ge, Y., He, K., 2015. Bulliform Phytolith Research in Wild and Domesticated Rice Paddy Soil in South China. *PLOS ONE* 10, e0141255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141255>

Hufford, M.B., Martínez-Meyer, E., Gaut, B.S., Eguiarte, L.E., Tenailon, M.I., 2012. Inferences from the Historical Distribution of Wild and Domesticated Maize Provide Ecological and Evolutionary Insight. *PLOS ONE* 7, e47659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047659>

Humphreys, G.S., Hart, D.M., Symons, N.A., Field, R.J., 2003. Phytoliths as indicators of process in soils, in: *Phytolith and Starch Research in the Australian-Pacific-Asian Regions: The State of the Art : Papers from a Conference Held at the ANU, Canberra, Australia.*

Hutson, S.R., Stanton, T.W., Magnoni, A., Terry, R., Craner, J., 2007. Beyond the buildings: Formation processes of ancient Maya houselots and methods for the study of non-architectural space. *Journal of Anthropological Archaeology* 26, 442–473. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2006.12.001>

Hyland, E., Smith, S.Y., Sheldon, N.D., 2013. Representational bias in phytoliths from modern soils of central North America: Implications for paleovegetation reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 374, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.01.026>

- I -

Inomata, T., Triadan, D., MacLellan, J., Burham, M., Aoyama, K., Palomo, J.M., Yonenobu, H., Pinzón, F., Nasu, H., 2017. High-precision radiocarbon dating of political collapse and dynastic origins at the Maya site of Ceibal, Guatemala. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 1293–1298. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618022114>

Iriarte, J., 2003. Assessing the feasibility of identifying maize through the analysis of cross-shaped size and three-dimensional morphology of phytoliths in the grasslands of southeastern South America. *Journal of Archaeological Science* 30, 1085–1094. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(02\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(02)00164-4)

Iriarte, J., 2006. Vegetation and climate change Since 14,810 14C yr B.P. in southeastern Uruguay and implications for the rise of early Formative societies. *Quaternary Research* 65, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.05.005>

Iriarte, J., Paz, E.A., 2009. Phytolith analysis of selected native plants and modern soils from southeastern Uruguay and its implications for paleoenvironmental and archeological reconstruction. *Quaternary International, Perspectives on Phytolith Research: 6th International Meeting on Phytolith Research* 193, 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.008>

Iriarte, J., Glaser, B., Watling, J., Wainwright, A., Birk, J.J., Renard, D., Rostain, S., McKey, D., 2010. Late Holocene Neotropical agricultural landscapes: phytolith and stable carbon isotope analysis of raised fields from French Guianan coastal savannahs. *Journal of Archaeological Science* 37, 2984–2994. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.016>

Islebe, G.A., Hooghiemstra, H., Brenner, M., Curtis, J.H., Hodell, D.A., 1996. A Holocene vegetation history from lowland Guatemala. *The Holocene* 6, 265–271. <https://doi.org/10.1177/095968369600600302>

Iturralde-Vinent, M.A., 2003. The conflicting paleontologic versus stratigraphic record of the formation of the Caribbean Seaway. In *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79), 75–88.

Iturralde-Vinent, M.A., 2004. La Paleogeografía del Caribe y sus implicaciones para la biogeografía histórica. *Revista del Jardín Botánico Nacional* 25/26, 49–78.

Iturralde-Vinent, M.A., 2006. Meso-Cenozoic Caribbean Paleogeography: Implications for the Historical Biogeography of the Region. *International Geology Review* 48, 791–827. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.48.9.791>

- J -

Jacob, J.S., 1995. Ancient Maya Wetland Agricultural Fields in Cobweb Swamp, Belize: Construction, Chronology, and Function. *Journal of Field Archaeology* 22, 175–190. <https://doi.org/10.1179/009346995791547877>

Jaenicke-Despres, V., 2003. Early Allelic Selection in Maize as Revealed by Ancient DNA. *Science* 302, 1206–1208. <https://doi.org/10.1126/science.1089056>

Jain, R.K., 1965. Studies in musaceae. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section B* 61, 170–179. <https://doi.org/10.1007/BF03051542>

Jaramillo, C.A., 2002. Response of tropical vegetation to Paleogene warming. *Paleobiology* 28, 222–243. [https://doi.org/10.1666/0094-8373\(2002\)028<0222:ROTVTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0094-8373(2002)028<0222:ROTVTP>2.0.CO;2)

Jaramillo, C.A., Dilcher, D.L., 2000. Microfloral diversity patterns of the late Paleocene–Eocene interval in Colombia, northern South America. *Geology* 28, 815–818. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<815:MDPOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<815:MDPOTL>2.0.CO;2)

Jaramillo, C., Rueda, M.J., Mora, G., 2006. Cenozoic Plant Diversity in the Neotropics. *Science* 311, 1893–1896. <https://doi.org/10.1126/science.1121380>

Jarvis, S.C., 1987. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. *Plant Soil* 97, 429–437. <https://doi.org/10.1007/BF02383233>

Johnston, K.J., 2003. The intensification of pre-industrial cereal agriculture in the tropics: Boserup, cultivation lengthening, and the Classic Maya. *Journal of Anthropological Archaeology* 22, 126–161. [https://doi.org/10.1016/S0278-4165\(03\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4165(03)00013-8)

Jones, G.D., 2008. The lowlands maya, from the conquest to the present . In *The Cambridge history of the native peoples of the Americas*, vol. II : Mesoamerica. Cambridge University Press.

- Jones, J.G.**, 1994. Pollen evidence for early settlement and agriculture in northern Belize. *Palynology* 18, 205–211. <https://doi.org/10.1080/01916122.1994.9989445>
- Jones, L.H.P., Handreck, K.A.**, 1965. Studies on Silica in the oat plant III, Uptake of Silica from soils by the plant. *Plant and Soil* 23, 79–96. https://www.jstor.org/stable/42932125?seq=1#page_scan_tab_contents
- Jones, L.H.P., Handreck, K.A.**, 1967. Silica In Soils, Plants, and Animals, in: Norman, A.G. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 107–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)
- Jones, R.L.**, 1964. Note on Occurrence of Opal Phytoliths in Some Cenozoic Sedimentary Rocks. *Journal of Paleontology* 38, 773–775.
- Jørgensen, P.M., León-Yáñez, S.**, 1999. Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 75, 904.
- Jouault, S.**, 2018. *Mayas d'hier et d'aujourd'hui: le rôles des sociétés locales dans le développement touristique*. Presses universitaires de Rennes.

- K -

- Kaplan, L., Lentz, D.L., Sloten, V., Sheets, P., Hood, A.N.**, 2015. Phaseolus from Cerén—A Late Classic Maya Site. *Econ Bot* 69, 150–160. <https://doi.org/10.1007/s12231-015-9307-x>
- Kealhofer, L., Piperno, D.R.**, 1998. Opal Phytoliths in Southeast Asian Flora. *Smithsonian Contributions to Botany* 1–39. <https://doi.org/10.5479/si.0081024X.88>
- Kealhofer, L., Penny, D.**, 1998. A combined pollen and phytolith record for fourteen thousand years of vegetation change in northeastern Thailand. *Review of Palaeobotany and Palynology* 103, 83–93. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(98\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(98)00029-3)
- Kemp, T.S.**, 2005. *The origin & evolution of mammals*. Oxford University Press, England.
- Kennett, D.J., Breitenbach, S.F.M., Aquino, V.V., Asmerom, Y., Awe, J., Baldini, J.U.L., Bartlein, P., Culleton, B.J., Ebert, C., Jazwa, C., Macri, M.J., Marwan, N., Polyak, V., Prufer, K.M., Ridley, H.E., Sodemann, H., Winterhalder, B., Haug, G.H.**, 2012. Development and Disintegration of Maya Political Systems in Response to Climate Change. *Science* 338, 788–791. <https://doi.org/10.1126/science.1226299>
- Kerns, B.K., Moore, M.M., Hart, S.C.**, 2001. Estimating forest-grassland dynamics using soil phytolith assemblages and $\delta^{13}C$ of soil organic matter. *Écoscience* 8, 478–488. <https://doi.org/10.1080/11956860.2001.11682678>
- Killion, T.W.**, 1990. Cultivation Intensity and Residential Site Structure: An Ethnoarchaeological Examination of Peasant Agriculture in the Sierra de los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Latin American Antiquity* 1, 191–215. <https://doi.org/10.2307/972161>
- Killion, T.W.**, 1992. *Gardens of prehistory: the archaeology of settlement agriculture in Greater Mesoamerica*. University of Alabama Press, Tuscaloosa.
- Kim, J.G., Rejmánková, E.**, 2002. Recent history of sediment deposition in marl- and sand-based marshes of Belize, Central America. *CATENA* 48, 267–291. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00031-0)

- Kim, S.G., Kim, K.W., Park, E.W., Choi, D.,** 2002. Silicon-Induced Cell Wall Fortification of Rice Leaves: A Possible Cellular Mechanism of Enhanced Host Resistance to Blast. *Phytopathology* 92, 1095–1103. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.10.1095>
- Kirchhoff, P.,** 1960. Mesoamérica, Sus límites geográficos, composición étnica y caracteres culturales. *Acta Americana* 1, 92-107.
- Kirchholtes, R.P.J., van Mourik, J.M., Johnson, B.R.,** 2015. Phytoliths as indicators of plant community change: A case study of the reconstruction of the historical extent of the oak savanna in the Willamette Valley Oregon, USA. *CATENA* 132, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.004>
- Kohler, F.,** 2011. McAnany Patricia and Norman Yoffee (eds), Questioning collapse. Human resilience, ecological vulnerability, and the aftermath of empire. *Journal de la société des américanistes* 321–324.
- Kottke, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F.,** 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 259-263
- Krause, S., Beach, T., Luzzadder-Beach, S., Guderjan, T.H., Valdez, F., Eshleman, S., Doyle, C., Bozarth, S.R.,** 2019. Ancient Maya wetland management in two watersheds in Belize: Soils, water, and paleoenvironmental change. *Quaternary International, Landforms, sediments, soils and palaeosols as records of present and former environmental conditions and human-environment interactions* 502, 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.029>
- Kunen, J.L.,** 2001. Ancient Maya Agricultural Installations and the Development of Intensive Agriculture in NW Belize. *Journal of Field Archaeology* 28, 325–346. <https://doi.org/10.1179/jfa.2001.28.3-4.325>
- Kunen, J.L., Culbert, T.P., Fialko, V., McKee, B.R., Grazioso, L.,** 2000. Bajo communities: a case study from the central Petén. *Culture & Agriculture* 22, 15-31. <https://doi.org/10.1525/cag.2000.22.3.15>
- Kurmann, M.H.,** 1985. An opal phytolith and palynomorph study of extant and fossil soils in Kansas (U.S.A.). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 49, 217–235. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(85\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(85)90055-0)
- Kvedaras, O.L., Byrne, M.J., Coombes, N.E., Keeping, M.G.,** 2009. Influence of plant silicon and sugarcane cultivar on mandibular wear in the stalk borer *Eldana saccharina*. *Agricultural and Forest Entomology* 11, 301–306. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2009.00430.x>
- L -
- Lahaye, C., Hernandez, M., Boëda, E., Felice, G.D., Guidon, N., Hoeltz, S., Lourdeau, A., Pagli, M., Pessis, A.-M., Rasse, M., Viana, S.,** 2013. Human occupation in South America by 20,000 BC: the Toca da Tira Peia site, Piauí, Brazil. *Journal of Archaeological Science* 40, 2840–2847. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.02.019>
- Lamartine de, A.,** 1820 *Méditations poétiques*. Nouvelles.
- Landon, A.,** 2008. The “How” of the Three Sisters: The Origins of Agriculture in Mesoamerica and the Human Niche. *Nebraska Anthropologist*.
- Langhe, E.D., Vrydaghs, L., Maret, P. de, Perrier, X., Denham, T.,** 2009. Why Bananas Matter: An introduction to the history of banana domestication. *Ethnobotany Research and Applications* 7, 165–177.

- Lavallée, D.**, 2005. Néolithisations en Amérique: Des prédateurs semi-nomades aux sociétés complexes. *Annales. Histoire, Sciences Sociales* 60, 1035–1067. <https://doi.org/10.1017/S0395264900019363>
- Law, C., Exley, C.**, 2011. New insight into silica deposition in horsetail (*Equisetum arvense*). *BMC Plant Biology* 11, 112. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-112>
- Le Bot, Y.**, 1992. *La guerre en terre maya: communauté, violence et modernité au Guatemala, 1970-1992*. Karthala Editions, Paris.
- Le Thomas, A., Doyle, J.A.**, 1996. Geographic relationships of Malagasy Annonaceae. *Biogéographie de Madagascar*, 85-94. http://madadocv1.irenala.edu.mg/documents/v02168_GEO.pdf
- Lecointre, G., Fortin, C., Bonnet, M. L.**, 2015. *Guide critique de l'évolution*. Belin, Paris.
- Lecointre, G., Le Guyader, H.**, 2006. *Classification phylogénétique du vivant*, 3. éd., revue et augm. ed. Belin, Paris.
- Lelono, E.B., Morley, R.J.**, 2011. Oligocene palynological succession from the East Java Sea. *Geological Society, London, Special Publications* 355, 333–345. <https://doi.org/10.1144/SP355.17>
- Lemonnier, E.**, 2006. *La structure de l'habitat du site maya classique de la Joyanca (Petén Nord-Ouest, Guatemala) dans son environnement local*. Thèse de Doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- Lemonnier, E., Cotom Nimatuj, J.A.**, 2017. Operación i.1b: ultima fase del programa de reconocimiento y mapeo de la zona residencial periférica del sitio: patrón de asentamiento y agricultura. In *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014, Informe de la Séptima Temporada de Campo 2016*, 17-26.
- Lentfer, C.J.**, 2009. Tracing Domestication and Cultivation of Bananas from Phytoliths: An update from Papua New Guinea. *Ethnobot. Res. App.* 7, 247. <https://doi.org/10.17348/era.7.0.247-270>
- Lentz, D.L., Ramírez-Sosa, C.R.**, 2002. *Cerén plant resources: Abundance and diversity. Before the volcano erupted: the ancient Cerén village in Central America*, University of Texas Press, Austin.
- Lentz, D.L., Dunning, N.P., Scarborough, V.L.**, 2015. *Tikal: Paleoecology of an Ancient Maya City*. Cambridge University Press.
- Lentz, D.L., Hockaday, B.**, 2009. Tikal timbers and temples: ancient Maya agroforestry and the end of time. *Journal of Archaeological Science* 36, 1342–1353. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.01.020>
- Lentz, D.L., Magee, K., Weaver, E., Jones, J.G., Tankersley, K.B., Hood, A., Islebe, G., Ramos-Hernandez, C.E., Dunning, N.P.**, 2015. Agroforestry and agricultural practices of the ancient Maya at Tikal. *Tikal: Paleoecology of an ancient Maya city*, 152-185. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139227209.009>
- Levasseur, V., Olivier, A.**, 2000. The farming system and traditional agroforestry systems in the Maya community of San Jose, Belize. *Agroforestry Systems* 49, 275–288. <https://doi.org/10.1023/A:1006327403980>
- Lewis, R.O.**, 1978. Use of opal phytoliths in paleoenvironmental reconstruction. *Wyoming Contributions to Anthropology* 1, 127-132. <https://ethnobiology.org/sites/default/files/pdfs/JoE/1-1/Lewis1981.pdf>
- Leyden, B.W.**, 1987. Man and Climate in the Maya Lowlands. *Quaternary Research* 28, 407–414. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90007-X)

- Leyden, B.W.**, 2002. Pollen evidence for climatic variability and cultural disturbance in the maya lowlands. *Ancient Mesoamerica* 13, 85–101. <https://doi.org/10.1017/S0956536102131099>
- Li, H.-T., Yi, T.-S., Gao, L.-M., Ma, P.-F., Zhang, T., Yang, J.-B., Gitzendanner, M.A., Fritsch, P.W., Cai, J., Luo, Y., Wang, H., van der Bank, M., Zhang, S.-D., Wang, Q.-F., Wang, J., Zhang, Z.-R., Fu, C.-N., Yang, J., Hollingsworth, P.M., Chase, M.W., Soltis, D.E., Soltis, P.S., Li, D.-Z.**, 2019. Origin of angiosperms and the puzzle of the Jurassic gap. *Nature Plants* 5, 461–470. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0421-0>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.-G., Christie, P.**, 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution, Environmental Pollution in China* 147, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Limondin-Lozouet, N.**, 2002. Les mollusques continentaux. *Géologie de la Préhistoire: méthodes, techniques, applications*. Géopré: Presses Universitaires de Perpignan, 773-784.
- Litow, P., Baker, M., Hildebrand, P.**, 2001. Swidden Agriculture in a Forest Society: Livelihood Strategies in the Maya Biosphere Reserve Community of Uaxactún, Petén, Guatemala. *JIAEE* 8. <https://doi.org/10.5191/jiaee.2001.08306>
- Liu, L., Jie, D., Liu, H., Li, N., Guo, J.**, 2013. Response of phytoliths in *Phragmites communis* to humidity in NE China. *Quaternary International* 304, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.020>
- Lobato, R.**, 1997. Les indiens du Chiapas et la forêt Lacandon. Editions L'Harmattan, Paris.
- Lohse, J.C., Awe, J., Griffith, C., Rosenswig, R.M., Valdez, F.**, 2006. Preceramic Occupations in Belize: Updating the Paleoindian and Archaic Record. *Latin American Antiquity* 17, 209–226 <https://doi.org/10.2307/25063047>
- Lorente, F.L., Pessenda, L.C.R., Calegari, M.R., Cohen, M.C.L., Rossetti, D., Giannini, P.C.F., Junior, A.A.B., de Castro, D.F., França, M.C., Bendassolli, J.A. and Macario, K.**, 2015. Fitólitos como indicadores de mudanças ambientais durante o Holoceno na costa norte do estado do Espírito Santo (Brasil). *Quaternary and Environmental Geosciences*, 6(1).
- Loreto, B.F.E.**, 2011. Indicadores ecológicos de la zona riparia del río San Pedro, Tabasco, México. Thèse de doctorat, Colegio de la Frontera Sur.
- Lowe, G.W.**, 1981. Olmec Horizons Defined in Mound 20, San Isidro, Chiapas. *Olmec and Their Neighbors*. Washington, D.C.: Dumbarton Oaks.
- Lu, H., Liu, K.-B.**, 2003. Morphological variations of lobate phytoliths from grasses in China and the south-eastern United States. *Diversity and Distributions* 9, 73–87. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2003.00166.x>
- Lu, H., Liu, K.**, 2003. Phytoliths of common grasses in the coastal environments of southeastern USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58, 587–600. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(03)00137-9)
- Lu, H.-Y., Wu, N.-Q., Yang, X.-D., Jiang, H., Liu, K., Liu, T.-S.**, 2006. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: phytolith-based transfer functions. *Quaternary Science Reviews* 25, 945–959. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.014>
- Lucas, G.**, 2017. The paradigm concept in archaeology. *World Archaeology* 49, 260–270. <https://doi.org/10.1080/00438243.2016.1252688>

Lucas, Y., Luizao, F.J., Chauvel, A., Rouiller, J., Nahon, D., 1993. The Relation Between Biological Activity of the Rain Forest and Mineral Composition of Soils. *Science* 260, 521–523. <https://doi.org/10.1126/science.260.5107.521>

Lundell, C.L., 1932. Exploring Nohoxna: A Lost City of the First Maya Empire. *Southwest Review* 17, 395–406. <https://www.jstor.org/stable/43466224?seq=1>

Lundell, C.L., 1933a. The Agriculture of the Maya. *Southwest Review* 19, 65–77. <https://www.jstor.org/stable/43462047?seq=1>

Lundell, C.L., 1933b. Archeological Discoveries in the Maya Area. *Proceedings of the American Philosophical Society* 72, 147–179. <https://www.jstor.org/stable/984641?seq=1>

Lundell, C.L., 1937. The Vegetation of Petén. Carnegie Institution of Washington, Publication 478, Washington D.C.

Lundell, C.L., 1938. Plants probably utilized by the old empire Maya of Petén and adjacent lowlands. *Papers of the Michigan Academy of Science, Arts, and Letters* 24, 37–56. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015071693415&view=1up&seq=63>

Luzzadder-Beach, S., Beach, T.P., Dunning, N.P., 2012. Wetland fields as mirrors of drought and the Maya abandonment. *PNAS* 109, 3646–3651. <https://doi.org/10.1073/pnas.1114919109>

Luzzadder-Beach, S., Beach, T., Garrison, T., Houston, S., Doyle, J., Román, E., Bozarth, S., Terry, R., Krause, S., Flood, J., 2017. Paleoecology and Geoarchaeology at El Palmar and the El Zotz Region, Guatemala. *Geoarchaeology* 32, 90–106. <https://doi.org/10.1002/gea.21587>

Lyon-Caen, H., Barrier, E., Lasserre, C., Franco, A., Arzu, I., Chiquin, L., Chiquin, M., Duquesnoy, T., Flores, O., Galicia, O., Luna, J., Molina, E., Porras, O., Requena, J., Robles, V., Romero, J., Wolf, R., 2006. Kinematics of the North American–Caribbean–Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic–Motagua fault system. *Geophys. Res. Lett.* 33, L19309. <https://doi.org/10.1029/2006GL027694>

- M -

MacNeish, R.S., 1958. Preliminary Archaeological Investigations in the Sierra de Tamaulipas, Mexico. *Transactions of the American Philosophical Society* 48, 1–210. <https://doi.org/10.2307/1005840>

MacNeish, R.S., Peterson, F.A., Flanery, K.V., 1970. *The Prehistory of the Tehuacan Valley: Ceramics*. University of Texas Press, Austin.

MacPhee, R.D., Iturralde-Vinent, M.A., 1995. Origin of the Greater Antillean land mammal fauna, 1: New Tertiary fossils from Cuba and Puerto Rico. *American Museum of Natural History Novitates* 3141, 1–31.

Madella, M., Lancelotti, C., 2012. Taphonomy and phytoliths: A user manual. *Quaternary International* 275, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.008>

Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International Code for Phytolith Nomenclature 1.0. *Ann Bot* 96, 253–260. <https://doi.org/10.1093/aob/mci172>

Magaña, V., Amador, J.A., Medina, S., 1999. The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *J. Climate* 12, 1577–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)

- Magni, C.**, 2017. Le Guatemala: Sur les pas des ancêtres indiens. Ed. Errances, promenades archéologiques.
- Markewitz, D., Richter, D.D.**, 1998. The Bio in Aluminum and Silicon Geochemistry. *Biogeochemistry* 42, 235–252. <https://doi.org/10.1023/A:1005901417165>
- Márquez, A.R.C., Schwartz, N.B.**, 2008. Traditional Home Gardens Of Petén, Guatemala: Resource Management, Food Security, And Conservation. *etbi* 28, 305–317. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-28.2.305>
- Marshall, J.S.**, 2007. The geomorphology and physiographic provinces of Central America. *Central America: geology, resources and hazards*. CRC Press.
- Marshall, L.G., Webb, S.D., Sepkoski, J.J., Raup, D.M.**, 1982. Mammalian Evolution and the Great American Interchange. *Science* 215, 1351–1357. <https://doi.org/10.1126/science.215.4538.1351>
- Martens, U.**, 2007. High-pressure belts of central Guatemala: the Motagua suture and the Chuacús complex. In *Field Workshop of IGCP 546 "Subduction Zones of the Caribbean"*. Field Trip Guide.
- Martin, P.S.**, 1973. The Discovery of America: The first Americans may have swept the Western Hemisphere and decimated its fauna within 1000 years. *Science* 179, 969–974. <https://doi.org/10.1126/science.179.4077.969>
- Martin, S., Grube, N.**, 2000. *Chronicle of the Maya kings and queens: Deciphering the dynasties of the ancient Maya*. Thames & Hudson, London.
- Martinez, C., Goddard, L., Kushnir, Y., Ting, M.**, 2019. Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean. *Clim Dyn* 53, 825–846. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04616-4>
- Martínez, E., Galindo-Leal, C.**, 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. *Bot. Sci.* 7. <https://doi.org/10.17129/botsci.1660>
- Marton, G.L., Buffler, R.T.**, 1999. Chapter 3 Jurassic—early cretaceous tectono-paleogeographic evolution of the southeastern gulf of Mexico basin, in: Mann, P. (Ed.), *Sedimentary Basins of the World, Caribbean Basins*. Elsevier, pp. 63–91. [https://doi.org/10.1016/S1874-5997\(99\)80037-9](https://doi.org/10.1016/S1874-5997(99)80037-9)
- Massey, F.P., Hartley, S.E.**, 2006. Experimental demonstration of the antiherbivore effects of silica in grasses: impacts on foliage digestibility and vole growth rates. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273, 2299–2304. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3586>
- Massey F.P, Smith M.J, Lambin X, Hartley S.E**, 2008. Are silica defences in grasses driving vole population cycles? *Biology Letters* 4, 419–422. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0106>
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M.M., G, J.S., Buckler, E., Doebley, J.**, 2002. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *PNAS* 99, 6080–6084. <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>
- Matsutani, A.**, 1972. Spodographic analysis of ash from the Kotosh site. *Andes* 4, 319–326.
- Maury, C.J.**, 1930. O Cretaceo da Parahyba do Norte. Serviço Geologico e Mineralogico do Brasil Monografias 8, 350.
- McAnany, P.A., Yoffee, N. (Eds.)**, 2010. *Questioning collapse: human resilience, ecological vulnerability, and the aftermath of empire*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.

- McCune, J.L., Pellatt, M.G.**, 2013. Phytoliths of Southeastern Vancouver Island, Canada, and their potential use to reconstruct shifting boundaries between Douglas-fir forest and oak savannah. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 383–384, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.05.003>
- McLaren, D., Fedje, D., Dyck, A., Mackie, Q., Gauvreau, A., Cohen, J.**, 2018. Terminal Pleistocene epoch human footprints from the Pacific coast of Canada. *PLOS ONE* 13, e0193522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193522>
- McMichael, C.H., Piperno, D.R., Neves, E.G., Bush, M.B., Almeida, F.O., Mongeló, G., Eyjolfssdottir, M.B.**, 2015. Phytolith Assemblages Along a Gradient of Ancient Human Disturbance in Western Amazonia. *Front. Ecol. Evol.* 3. <https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00141>
- McNaughton, S.J., Tarrants, J.L.**, 1983. Grass leaf silicification: Natural selection for an inducible defense against herbivores. *PNAS* 80, 790–791. <https://doi.org/10.1073/pnas.80.3.790>
- McNeil, C.L.**, 2012. Deforestation, agroforestry, and sustainable land management practices among the Classic period Maya. *Quaternary International* 249, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.055>
- Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L.**, 2004. *The limits to growth: the 30-year update*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vt.
- Medina-Elizalde, M., Rohling, E.J.**, 2012. Collapse of Classic Maya Civilization Related to Modest Reduction in Precipitation. *Science* 335, 956–959. <https://doi.org/10.1126/science.1216629>
- Meggers, B.J.**, 1954. Environmental Limitation on the Development of Culture¹. *American Anthropologist* 56, 801–824. <https://doi.org/10.1525/aa.1954.56.5.02a00060>
- Menéndez, L.P., Osterrieth, M., Oliva, F.**, 2009. A first phytolith approximation to diet study in the archaeological site Gascón 1, Pampean Region, República Argentina. *Quaternary International, Quaternary Research in the Southern Alps of Italy* 204, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.02.006>
- Mercader, J., Bennett, T., Esselmont, C., Simpson, S., Walde, D.**, 2009. Phytoliths in woody plants from the Miombo woodlands of Mozambique. *Annals of Botany* 104, 91–113. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp097>
- Meunier, J.-D.**, 2003. Le rôle des plantes dans le transfert du silicium à la surface des continents. *Comptes Rendus Geoscience* 335, 1199–1206. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.07.007>
- Meyer, S., Reeb, C., Bosdeveix, R.**, 2008. *Botanique: biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris.
- Meyers, P.A., Teranes, J.L.**, 2001. Sediment Organic Matter, in: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Geochemical Methods, Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 239–269. https://doi.org/10.1007/0-306-47670-3_9
- Michaud, F., Fourcade, E.**, 1989. Stratigraphie et paléogéographie du Jurassique et du Crétacé du Chiapas (Sud-Est du Mexique). *Bulletin de la Société géologique de France* 3, 639-650. https://www.researchgate.net/profile/Francois-Michaud2/publication/279620255_Jurassic_and_Cretaceous_stratigraphy_and_palaeogeography_of_Chiapas_southeastern_Mexico/Stratigraphie_et_paleogeographie_du_Jurassique_et_du_Cretace_du_Chiapas_Sud-Est_du_Mexique/links/55ddc49e08ae79830bb57b95.pdf
- Miller, K.G., Mountain, G.S., Browning, J.V., Kominz, M., Sugarman, P.J., Christie-Blick, N., Katz, M.E., Wright, J.D.**, 1998. Cenozoic global sea level, sequences, and the New Jersey Transect: Results From coastal plain and continental slope drilling. *Reviews of Geophysics* 36, 569–601. <https://doi.org/10.1029/98RG01624>

Miller, K.G., Sugarman, P.J., Browning, J.V., Kominz, M.A., Hernández, J.C., Olsson, R.K., Wright, J.D., Feigenson, M.D., Sickel, W.V., 2003. Late Cretaceous chronology of large, rapid sea-level changes: Glacioeustasy during the greenhouse world. *Geology* 31, 585–588. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0585:LCCOLR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0585:LCCOLR>2.0.CO;2)

Moholy-Nagy, H., 1978. The Utilization of Pomacea Snails at Tikal, Guatemala. *Am. antiq.* 43, 65–73. <https://doi.org/10.2307/279632>

Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Angel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A., Ramirez, V., Niño, H., 2015. Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science* 348, 226–229. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2815>

Morcote-Ríos, G., Raz, L., Giraldo-Cañas, D., Franky, C.E. and León Sicard, T., 2013. Terras Pretas de Índio of the Caquetá-Japurá River (Colombian Amazonia). *Tipití: Journal of the Society for the Anthropology of Lowland South America*, 11, 30-39.

Morcote-Ríos, G., Bernal, R., Raz, L., 2016. Phytoliths as a tool for archaeobotanical, palaeobotanical and palaeoecological studies in Amazonian palms. *Bot J Linn Soc* 182, 348–360. <https://doi.org/10.1111/boj.12438>

Morley, R. J., 2011. Cretaceous and Tertiary climate change and the past distribution of megathermal rainforests. In *Tropical rainforest responses to climatic change*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Morley, S.G., 1938. The inscriptions of Petén, volume III. Carnegie Institution of Washington.

Mourier, T., Bengtson, P., Bonhomme, M., Buge, E., Cappetta, H., Crochet, J.-Y., Feist, M., Hirsch, K.F., Jaillard, E., Laubacher, G., Lefranc, J.P., Moullade, M., Noblet, C., Pons, D., Rey, J., Sigé, B., Tambareau, Y., Taquet, P., 1988. The Upper Cretaceous - Lower Tertiary marine to continental transition in the Bagua basin, northern Peru - Paleontology, biostratigraphy, radiometry, correlations. *nos* 19, 143–177. <https://doi.org/10.1127/nos/19/1988/143>

Mulholland, S.C., 1989. Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: a comparison to general patterns. *Journal of Archaeological Science* 16, 489–511. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(89\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0305-4403(89)90070-8)

Mulholland, S.C., Rapp, G., 1992. A Morphological Classification of Grass Silica-Bodies, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, Boston, MA, pp. 65–89. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_4

Mueller, A.D., Islebe, G.A., Hillesheim, M.B., Grzesik, D.A., Anselmetti, F.S., Ariztegui, D., Brenner, M., Curtis, J.H., Hodell, D.A., Venz, K.A., 2009. Climate drying and associated forest decline in the lowlands of northern Guatemala during the late Holocene. *Quaternary Research* 71, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.10.002>

Muller, J., Di Giacomo, E., Van Erve, A.W., 1987. A palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary, and Quaternary of Northern South America. *AASP Contrib. Ser.* 19, 7–76.

- N -

Naranjo-García, E., Olivera-Carrasco, M.T., 2014. Moluscos dulceacuícolas introducidos e invasores. In *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Nations, J.D., Nigh, R.B., 1980. The Evolutionary Potential of Lacandon Maya Sustained-Yield Tropical Forest Agriculture. *Journal of Anthropological Research* 36, 1–30. <https://doi.org/10.1086/jar.36.1.3629550>

- Nava, M., Severeyn, H., Machado, N.,** 2011. Distribución y taxonomía de *Pyrgophorus platyrachis* (Caenogastropoda: Hydrobiidae), en el Sistema de Maracaibo, Venezuela. *Revista de Biología Tropical* 59, 1165–1172.
- Neff, H., Pearsall, D.M., Jones, J.G., Arroyo, B., Collins, S.K., Freidel, D.E.,** 2006. Early Maya Adaptive Patterns: Mid-Late Holocene Paleoenvironmental Evidence from Pacific Guatemala. *Latin American Antiquity* 17, 287–315. <https://doi.org/10.2307/25063054>
- Neumann, D., zur Nieden, U.,** 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry* 56, 685–692. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00472-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00472-6)
- Neumann, K., Fahmy, A., Lespez, L., Ballouche, A., Huysecom, E.,** 2009. The Early Holocene palaeoenvironment of Ounjougou (Mali): Phytoliths in a multiproxy context. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 276, 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.03.001>
- Neumann, K., Fahmy, A.G., Müller-Schaeßel, N., Schmidt, M.,** 2017. Taxonomic, ecological and palaeoecological significance of leaf phytoliths in West African grasses. *Quaternary International*, 9th International Meeting of Phytolith Research (IMPR) 434, 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.039>
- Neumann, K., Strömberg, C.A.E., Ball, T., Albert, R.M., Vrydaghs, L., Cummings, L.S.,** 2019. International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany* 124, 189–199. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz064>
- Niederberger Betton, C.** (1987). *Paleopaysages et archeologie pre-urbaine du Bassin de Mexico*. CEMCA, Mexico.
- Nigh, R., Diemont, S.A.,** 2013. The Maya milpa: fire and the legacy of living soil. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11, e45–e54. <https://doi.org/10.1890/120344>
- Nondédéo, P., Dorison, A.** 2018. Operación I.5 : Analysis preliminar de la imagen LiDAR. In *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018, Informe de la Octava Temporada de Campo 2017*. 15-26.
- Nondédéo, P., Morales-Aguilar, C., Patiño, A., Forné M., Andrieu C., Sion, J., Michelet, D., Arnauld, M-C., Gillot, C., de León, M., Cotom, J., Lemonnier, E., Pereira, G., and Barrientos, I.,** 2012. Prosperidad económica en Naachtun: resultados de las dos primeras temporadas de investigación, in: Arroyo, B., Paiz Aragon, L., and Mejía, H. (Eds.), *XXV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Asociación Tikal, Guatemala, pp. 227-235. http://www.asociaciontikal.com/wp-content/uploads/2017/03/019_Nondedeo_2.pdf
- Nondédéo, P., Patiño, A., Sion, J., Michelet, D., Morales-Aguilar, C.,** 2013. Crisis múltiples en Naachtun: aprovechadas, superadas e irreversibles. In *Millenary Maya Societies: Past Crises and Resilience*. Mesoweb. www.mesoweb.com/publications/MMS/9_Nondedeo_etal.pdf.
- Nondédéo, P., Garrido, L., Patiño, A., Lacadena, A., Cases, I., Lemonnier, E., Michelet, D., Hiquet, J., Andrieu, C., Morales-Aguilar, C., Cotom-Nimatuj, J.A., Purdue, L., Perla, D., Goudiaby, H., Gonzalez, G., Gillot, C., Diaz, A., Quinonez, J., Barrientos, I., Sion, J., Dussol, L., Colin, M.,** 2014. Una mirada hacia Naachtun después de cinco años de investigación (Proyecto Naachtun 2010-2014). In *XXVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Asociación Tikal.
- Nondédéo, P., Garrido, L., Patiño, A., Lacadena, A., Dominique, M., Hiquet, J., Cotom, J., Castanet, C., Perla, D., Goudiaby, H., Patrois, J., Gillot, C., Diaz, A., Estrada, P. Quinonez, J., Barrientos, I., Dussol, L., Andrieu, C., Schwendener, O., Colin, M.,** 2015. En busca del Clásico temprano: la temporada 2015 del Proyecto Naachtun (2015-2018) Peten. In *XXIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Asociación Tikal.

Nondédéo, P., Lacadena, A., Cases, I., Hiquet, J., & Michelet, D., 2016. Teotihuacanos y Mayas en la “Entrada” de 11 Eb’ (378 dC): Nuevos datos de Naachtun, Peten, Guatemala. In 21st European Maya Conferences, Moscow.

Nondédéo, P., García-Gallo, A.L., Martín, J.I.C., 2019. Teotihuacanos y mayas en la “entrada” de 11 Eb’ (378 d.C.): nuevos datos de Naachtun, Petén, Guatemala. *Revista Española de Antropología Americana* 49, 53–75. <https://doi.org/10.5209/reaa.64960>

Nooren, K., Hoek, W.Z., Dermody, B.J., Galop, D., Metcalfe, S., Islebe, G., Middelkoop, H., 2018. Climate impact on the development of Pre-Classic Maya civilisation. *Clim. Past* 14, 1253–1273. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1253-2018>

Novello, A., Barboni, D., 2015. Grass inflorescence phytoliths of useful species and wild cereals from sub-Saharan Africa. *Journal of Archaeological Science* 59, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.03.031>

Novello, A., Barboni, D., Berti-Equille, L., Mazur, J.-C., Poilecot, P., Vignaud, P., 2012. Phytolith signal of aquatic plants and soils in Chad, Central Africa. *Review of Palaeobotany and Palynology* 178, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.03.010>

Novello, A., Bamford, M.K., van Wijk, Y., Wurz, S., 2018. Phytoliths in modern plants and soils from Klasies River, Cape Region (South Africa). *Quaternary International* 464, 440–459. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.10.009>

Nunn, N., Qian, N., 2010. The Columbian Exchange: A History of Disease, Food, and Ideas. *Journal of Economic Perspectives* 24, 163–188. <https://doi.org/10.1257/jep.24.2.163>

- 0 -

O’Dea, A., Lessios, H.A., Coates, A.G., Eytan, R.I., Restrepo-Moreno, S.A., Cione, A.L., Collins, L.S., Queiroz, A. de, Farris, D.W., Norris, R.D., Stallard, R.F., Woodburne, M.O., Aguilera, O., Aubry, M.-P., Berggren, W.A., Budd, A.F., Cozzuol, M.A., Coppard, S.E., Duque-Caro, H., Finnegan, S., Gasparini, G.M., Grossman, E.L., Johnson, K.G., Keigwin, L.D., Knowlton, N., Leigh, E.G., Leonard-Pingel, J.S., Marko, P.B., Pyenson, N.D., Racheilo-Dolmen, P.G., Soibelzon, E., Soibelzon, L., Todd, J.A., Vermeij, G.J., Jackson, J.B.C., 2016. Formation of the Isthmus of Panama. *Science Advances* 2, e1600883. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600883>

O’Mansky, M., Dunning, N.P., 2004. Settlement and Late Classic political disintegration in the Petexbatun region, Guatemala. In *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition, And Transformation*. University Press of Colorado.

Ollendorf, A.L., 1992. Toward a Classification Scheme of Sedge (Cyperaceae) Phytoliths, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, Boston, MA, pp. 91–111. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_5

Ollendorf, A.L., Mulholland, S.C., Rapp, G., 1988. Phytolith Analysis as a Means of Plant Identification: *Arundo donax* and *Phragmites communis*. *Ann Bot* 61, 209–214. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087544>

Orlov, D., 2013. *The Five Stages of Collapse: Survivors' Toolkit*. New Society Publishers.

Osterrieth, M., Madella, M., Zurro, D., Fernanda Alvarez, M., 2009. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International, Perspectives on Phytolith Research: 6th International Meeting on Phytolith Research* 193, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.002>

Osterrieth, M., Madella, M., Zurro, D., Fernanda Alvarez, M., 2009. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International* 193, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.002>

- P -

Pagden, A., Elliot, J.H., 1986. *Hernan Cortes Letters of Mexico*. Yale University Press.

Parmenter, C., Folger, D.W., 1974. Eolian Biogenic Detritus in Deep Sea Sediments: A Possible Index of Equatorial Ice Age Aridity. *Science* 185, 695–698. <https://doi.org/10.1126/science.185.4152.695>

Parr, J.F., 2006. Effect of fire on phytolith coloration. *Geoarchaeology* 21, 171–185. <https://doi.org/10.1002/gea.20102>

Parry, D.W., Smithson, F., 1964. Types of Opaline Silica Depositions in the Leaves of British Grasses. *Ann Bot* 28, 169–185. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083891>

Parry, D.W., Winslow, A., 1977. Electron-probe Microanalysis of Silicon Accumulation in the Leaves and Tendrils of *Pisum sativum* (L.) Following Root Severance. *Annals of Botany* 41, 275–278. https://www.jstor.org/stable/42770148?seq=1#page_scan_tab_contents

Patrois, J., 2016. Operacion III.4: studio iconografico de los monumentos esculpidos de Naachtun. In Informe final de la sexta temporada de campo 2015, Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018.

Patterson, B., Pascual, R., 1968. The Fossil Mammal Fauna of South America. *The Quarterly Review of Biology* 43, 409–451. <https://doi.org/10.1086/405916>

Pearsall, D.M., 1978. Phytolith Analysis of Archeological Soils: Evidence for Maize Cultivation in Formative Ecuador. *Science* 199, 177–178. <https://doi.org/10.1126/science.199.4325.177>

Pearsall, D.M., 1982. Phytolith Analysis: Applications of a New Paleoethnobotanical Technique in Archeology. *American Anthropologist* 84, 862–871. <https://doi.org/10.1525/aa.1982.84.4.02a00100>

Pearsall, D.M., Piperno, D.R., 1990. Antiquity of Maize Cultivation in Ecuador: Summary and Reevaluation of the Evidence. *Am. antiq.* 55, 324–337. <https://doi.org/10.2307/281650>

Pearsall, D.M., Dinan, E.H., 1992. Developing a Phytolith Classification System, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Springer US, Boston, MA, pp. 37–64. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_3

Pearsall, D.M., Piperno, D.R., Dinan, E.H., Umlauf, M., Zhao, Z., Benfer, R.A., 1995. Distinguishing rice (*Oryza sativa* Poaceae) from wild *Oryza* species through Phytolith analysis: Results of preliminary research. *Econ Bot* 49, 183–196. <https://doi.org/10.1007/BF02862923>

Pearsall, D.M., Chandler-Ezell, K., Chandler-Ezell, A., 2003. Identifying maize in neotropical sediments and soils using cob phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 30, 611–627. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(02)00237-6)

Pearsall, D.M., Chandler-Ezell, K., Zeidler, J.A., 2004. Maize in ancient Ecuador: results of residue analysis of stone tools from the Real Alto site. *Journal of Archaeological Science* 31, 423–442. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.09.010>

- Pennington, T.D., Sarukhán, J.,** 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.
- Pérez-Castro, A.B.,** 2002. La vision antropologica del mundo maya en los anos cuarenta: Yucatán Guatemala y chiapas. In Lengua y cultura mayas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Perry, L., Sandweiss, D.H., Piperno, D.R., Rademaker, K., Malpass, M.A., Umire, A., de la Vera, P.,** 2006. Early maize agriculture and interzonal interaction in southern Peru. *Nature* 440, 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature04294>
- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D.M., Piperno, D.R., Berman, M.J., Cooke, R.G., Rademaker, K., Ranere, A.J., Raymond, J.S., Sandweiss, D.H., Scaramelli, F., Tarble, K., Zeidler, J.A.,** 2007. Starch Fossils and the Domestication and Dispersal of Chili Peppers (*Capsicum* spp. L.) in the Americas. *Science* 315, 986–988. <https://doi.org/10.1126/science.1136914>
- Perry, R.,** 2001. Exploring Yucatán: A traveler's anthology. Espanada Press, Santa Barbara.
- Piperno, D.R.,** 1985. Phytolith analysis and tropical paleo-ecology: Production and taxonomic significance of siliceous forms in new world plant domesticates and wild species. *Review of Palaeobotany and Palynology* 45, 185–228. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(85\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0034-6667(85)90002-8)
- Piperno, D.R.,** 1985b. Phytolith taphonomy and distributions in archeological sediments from Panama. *Journal of Archaeological Science* 12, 247–267. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(85\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0305-4403(85)90032-9)
- Piperno, D.R.,** 1988. Phytolith analysis: an archaeological and geological perspective. Academic Press, San Diego.
- Piperno, D.R.,** 1991. The status of phytolith analysis in the American tropics. *J World Prehist* 5, 155–191. <https://doi.org/10.1007/BF00974678>
- Piperno, D.R.,** 1994. Phytolith and charcoal evidence for prehistoric slash-and-burn agriculture in the Darien rain forest of Panama. *The Holocene* 4, 321–325. <https://doi.org/10.1177/095968369400400312>
- Piperno, D.R.,** 2006. Quaternary Environmental History and Agricultural Impact on Vegetation in Central America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93, 274–296.
- Piperno, D.R.,** 2006. Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists. AltaMira Press, Lanham, MD.
- Piperno, D.R.,** 2009. Identifying crop plants with phytoliths (and starch grains) in Central and South America: A review and an update of the evidence. *Quaternary International, Perspectives on Phytolith Research: 6th International Meeting on Phytolith Research* 193, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.11.011>
- Piperno, D.R., Becker, P.,** 1996. Vegetational History of a Site in the Central Amazon Basin Derived from Phytolith and Charcoal Records from Natural Soils. *Quaternary Research* 45, 202–209. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.0020>
- Piperno, D.R., Pearsall, D.M.,** 1998. The silica bodies of tropical American grasses: morphology, taxonomy, and implications for grass systematics and fossil phytolith identification. *Smithsonian Contribution to Botany*, 85, 1–40.
- Piperno, D.R., Flannery, K.V.,** 2001. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: New

- accelerator mass spectrometry dates and their implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98, 2101–2103. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.4.2101>
- Piperno, D.R., Stothert, K.E.**, 2003. Phytolith Evidence for Early Holocene Cucurbita Domestication in Southwest Ecuador. *Science* 299, 1054–1057. <https://doi.org/10.1126/science.1080365>
- Piperno, D.R., Bush, M.B., Colinvaux, P.A.**, 1990. Paleoenvironments and Human Occupation in Late-Glacial Panama. *Quaternary Research* 33, 108–116. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(90\)90089-4](https://doi.org/10.1016/0033-5894(90)90089-4)
- Piperno, D.R., Andres, T.C., Stothert, K.E.**, 2000. Phytoliths in Cucurbita and other Neotropical Cucurbitaceae and their Occurrence in Early Archaeological Sites from the Lowland American Tropics. *Journal of Archaeological Science* 27, 193–208. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0443>
- Piperno, D.R., Holst, I., Wessel-Beaver, L., Andres, T.C.**, 2002. Evidence for the control of phytolith formation in Cucurbita fruits by the hard rind (Hr) genetic locus: Archaeological and ecological implications. *PNAS* 99, 10923–10928. <https://doi.org/10.1073/pnas.152275499>
- Piperno, D.R., Moreno, J.E., Iriarte, J., Holst, I., Lachniet, M., Jones, J.G., Ranere, A.J., Castanzo, R.**, 2007. Late Pleistocene and Holocene environmental history of the Iguala Valley, Central Balsas Watershed of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 11874–11881. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703442104>
- Piperno, D.R., Ranere, A.J., Holst, I., Iriarte, J., Dickau, R.**, 2009. Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 5019–5024. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106>
- Poelchau, M.F., Hamrick, J.L.**, 2013. Palaeodistribution modelling does not support disjunct Pleistocene refugia in several Central American plant taxa. *Journal of Biogeography* 40, 662–675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02648.x>
- Pohl, M.**, 1990. *Ancient Maya Wetland Agriculture: Excavations on Albion Island, Northern Belize*. Westview special studies in archaeological research. Boulder, Colo: Westview Press.
- Pohl, M.D., Pope, K.O., Jones, J.G., Jacob, J.S., Piperno, D.R., deFrance, S.D., Lentz, D.L., Gifford, J.A., Danforth, M.E., Josserand, J.K.**, 1996. Early Agriculture in the Maya Lowlands. *Latin Am. antiq.* 7, 355–372. <https://doi.org/10.2307/972264>
- Pohl, M.E.D., Piperno, D.R., Pope, K.O., Jones, J.G.**, 2007. Microfossil evidence for pre-Columbian maize dispersals in the neotropics from San Andrés, Tabasco, Mexico. *PNAS* 104, 6870–6875. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701425104>
- Pool, C.A., Loughlin, M.L., Ortiz Ceballos, P.**, 2018. Transisthmian ties: epi-olmec and izapan interaction. *Ancient Mesoam* 29, 413–437. <https://doi.org/10.1017/S0956536118000123>
- Pope, K.O.**, 2001. Origin and Environmental Setting of Ancient Agriculture in the Lowlands of Mesoamerica. *Science* 292, 1370–1373. <https://doi.org/10.1126/science.292.5520.1370>
- Postek, M.T.**, 1981. The Occurrence of Silica in the Leaves of *Magnolia grandiflora* L. *Botanical Gazette* 142, 124–134. <https://doi.org/10.1086/337202>
- Powell, E.A.**, 2008. Do Civilizations Really Collapse. *Archaeology* 61, 18–20.

Powers-Jones, A., Echlin, P. and Jones, M., 1997. Investigating ancient plant-water relations by means of the analytical microscopy of phytoliths. First European Meeting on phytolith research.

Prance, G.T., 1982. Biological diversification in the tropics. Columbia University Press, New York.

Prasad, V., Strömberg, C. a. E., Leaché, A.D., Samant, B., Patnaik, R., Tang, L., Mohabey, D.M., Ge, S., Sahni, A., 2011. Late Cretaceous origin of the rice tribe provides evidence for early diversification in Poaceae. *Nature Communications* 2, 480. <https://doi.org/10.1038/ncomms1482>

Prat, H., 1948. General Features of the Epidermis in Zea Mays. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 35, 341–351. <https://doi.org/10.2307/2394699>

Prychid, C.J., Rudall, P.J., Gregory, M., 2003. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. *Bot. Rev* 69, 377–440. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2004\)069\[0377:SABOSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2004)069[0377:SABOSB]2.0.CO;2)

Puig, H. (2001). *La forêt tropicale humide*. Belin.

Puleston, D.E., 1973. Ancient maya settlement patterns and environment at tikal, guatemala: implications for subsistence models. *Dissertations available from proquest.* Aai7414128. <https://repository.upenn.edu/dissertations/aai7414128>

Puleston, D.E., 1977. The art and archaeology of hydraulic agriculture in the Maya lowlands. *Social Process in Maya Prehistory: Studies in Honor of Sir Eric Thompson*, 449-467.

Purdue, L., 2014. Operación IV.6 y IV.7 : Agricultura y subsistencia. In Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014, Informe final de la quinta temporada de campo 2014, 579-592.

Purdue, L., 2018. Operación IV.7a Agricultura y subsistencia. In Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014, Informe final de la octava temporada de campo 2017, 345-356.

- Q -

Quirarte, J., 1977. Early art styles of Mesoamerica and early classic Maya art. In *The Origins of Maya Civilization*. University of New Mexico Press, Albuquerque.

- R -

Ragot, S., Breton, A., Dhonte, X., 2002. *Mayas: Guatemala. Les oubliés de l'histoire*. Autrement, Paris.

Rahder, M., 2014. Caring for Xate, caring for Xateros: NGO monitoring, livelihoods, and plant-human relations in Uaxactún, Guatemala. *Journal of Political Ecology* 21, 372–388. <https://doi.org/10.2458/v21i1.21141>

Ramírez, A.I.A., Rasbold, G.G., Parolin, M., Stevaux, J.C., 2019. Phytoliths and seeds in fluvial island paleoenvironment reconstruction (interaction with pollen analysis). *Journal of South American Earth Sciences* 89, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.011>

Ranere, A.J., Piperno, D.R., Holst, I., Dickau, R., Iriarte, J., 2009. The cultural and chronological context of early Holocene maize and squash domestication in the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 5014–5018. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812590106>

- Rasbold, G.G., McGlue, M.M., Stevaux, J.C., Parolin, M., Silva, A., Bergier, I.,** 2019. Sponge spicule and phytolith evidence for Late Quaternary environmental changes in the tropical Pantanal wetlands of western Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 518, 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.01.015>
- Raven, J.A.,** 1983. The Transport and Function of Silicon in Plants. *Biological Reviews* 58, 179–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>
- Raynor, G.S., Ogden, E.C., Hayes, J.V.,** 1972. Dispersion and Deposition of Corn Pollen from Experimental Sources. *Agronomy Journal* 64, 420–427. <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400040004x>
- Reese-Taylor, K., Mathews, P., Zamora, M., Rangel, M., Walker, D.S., Alvarado, S., Arredondo, E., Morton, S., Parry, R., Salazar, B., and Seibert, J.,** 2005. Proyecto Arqueológico Naachtun: Resultados preliminares de la primera temporada de campo 2004. XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 85–95.
- Reinhard, K.J., Danielson, D.R.,** 2005. Pervasiveness of phytoliths in prehistoric southwestern diet and implications for regional and temporal trends for dental microwear. *Journal of Archaeological Science* 32, 981–988. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.01.014>
- Rémus-Borel, W., Menzies, J.G., Bélanger, R.R.,** 2005. Silicon induces antifungal compounds in powdery mildew-infected wheat. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 66, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2005.05.006>
- Retallack, G.J.,** 2001. Cenozoic Expansion of Grasslands and Climatic Cooling. *The Journal of Geology* 109, 407–426. <https://doi.org/10.1086/320791>
- Reynolds, O.L., Keeping, M.G., Meyer, J.H.,** 2009. Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review. *Annals of Applied Biology* 155, 171–186. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00348.x>
- Ricardo, S.D.F., Coe, H.H.G., Dias, R.R., de Sousa, L. de O.F., Gomes, E.,** 2018. Reference collection of plant phytoliths from the Caatinga biome, Northeast Brazil. *Flora* 249, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.09.003>
- Rice, D.S., Rice, P.M.,** 1980. The Northeast Petén Revisited. *American Antiquity* 45, 432–454. <https://doi.org/10.2307/279858>
- Rice, P.M.,** 2015. Middle Preclassic Interregional Interaction and the Maya Lowlands. *J Archaeol Res* 23, 1–47. <https://doi.org/10.1007/s10814-014-9077-5>
- Ricketson, O.G.,** 1933. Excavations at Uaxactun. *The Scientific Monthly* 37, 72–86.
- Ridley, M.,** 2004. *Evolution*. Blackwell Scientific Publishing, Malden, MA..
- Robert, S., & Chenorkian, R. (2014).** Etudier les interactions hommes-milieus, pourquoi et comment ?. *Les interactions hommes-milieus*, edition Quae, pp. 182. <https://www.cairn.info/les-interactions-hommes-milieus--9782759221875-page-9.htm?contenu=article>
- Roberts, R.G., Flannery, T.F., Ayliffe, L.K., Yoshida, H., Olley, J.M., Prideaux, G.J., Laslett, G.M., Baynes, A., Smith, M.A., Jones, R., Smith, B.L.,** 2001. New Ages for the Last Australian Megafauna: Continent-Wide Extinction About 46,000 Years Ago. *Science* 292, 1888–1892. <https://doi.org/10.1126/science.1060264>
- Roman, S., Palmer, E., Brede, M.,** 2018. The Dynamics of Human–Environment Interactions in the Collapse of the

Classic Maya. *Ecological Economics* 146, 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.007>

Romero, O.E., Lange, C.B., Swap, R., Wefer, G., 1999. Eolian-transported freshwater diatoms and phytoliths across the equatorial Atlantic record: Temporal changes in Saharan dust transport patterns. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104, 3211–3222. <https://doi.org/10.1029/1998JC900070>

Rosenmeier, M.F., Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Guilderson, T.P., 2002. A 4000-Year Lacustrine Record of Environmental Change in the Southern Maya Lowlands, Petén, Guatemala. *Quaternary Research* 57, 183–190. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2305>

Rosenmeier, M.F., Brenner, M., Kenney, W.F., Whitmore, T.J., Taylor, C.M., 2004. Recent Eutrophication in the Southern Basin of Lake Petén Itzá, Guatemala: Human Impact on a Large Tropical Lake. *Hydrobiologia* 511, 161–172. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000014038.64403.4d>

Rosenmeier, M.F., Brenner, M., Hodell, D.A., Martin, J.B., Curtis, J.H., Binford, M.W., 2016. A model of the 4000-year paleohydrology ($\delta^{18}\text{O}$) record from Lake Salpetén, Guatemala. *Global and Planetary Change, Climate Change and Archaeology in Mesoamerica: A Mirror for the Anthropocene* 138, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.07.006>

Ross, J.M., 2004. Phytoliths from a Norse Greenlandic Quern Stone: A Preliminary Investigation. *Environmental Archaeology* 9, 99–106. <https://doi.org/10.1179/env.2004.9.1.99>

Ross, N.J., 2011. Modern tree species composition reflects ancient Maya “forest gardens” in northwest Belize. *Ecological Applications* 21, 75–84. <https://doi.org/10.1890/09-0662.1>

Roush, W., 1997. Squash Seeds Yield New View of Early American Farming. *Science* 276, 894–895. <https://doi.org/10.1126/science.276.5314.894>

Rovner, I., 1971. Potential of Opal Phytoliths for use in Paleoeological Reconstruction. *Quaternary Research* 1, 343–359. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90070-6)

Rovner, I., 1975. Plant opal phytolith analysis in midwestern archaeology. *Michigan academician* 7(2), 129–137.

Rovner, I., 1983. 6 - Plant Opal Phytolith Analysis: Major Advances in Archaeobotanical Research, in: Schiffer, M.B. (Ed.), *Advances in Archaeological Method and Theory*. Academic Press, San Diego, pp. 225–266. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-003106-1.50011-0>

Rovner, I., 1988. Macro- and micro-ecological reconstruction using plant opal phytolith data from archaeological sediments. *Geoarchaeology* 3, 155–163. <https://doi.org/10.1002/gea.3340030207>

Rudall, P.J., Prychid, C.J., Gregory, T., 2014. Epidermal Patterning and Silica Phytoliths in Grasses: An Evolutionary History. *Bot. Rev.* 80, 59–71. <https://doi.org/10.1007/s12229-014-9133-3>

Rull, V., 1999. Palaeofloristic and palaeovegetational changes across the Paleocene/Eocene boundary in northern South America. *Review of Palaeobotany and Palynology* 107, 83–95. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(99\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00014-7)

Runge, F., 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa —quantities, shapes, classification, and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology* 107, 23–53. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(99\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00018-4)

Ruprecht, F., 1866. Geobotanical investigations on chernozem, USSR. *Academy of Science, Bull. S. Petersburg*, 217–265.

Rushton, E.A., Metcalfe, S.E., Whitney, B.S., 2012. A late-Holocene vegetation history from the Maya lowlands, Lamanai, Northern Belize. *The Holocene* 23, 485–493. <https://doi.org/10.1177/0959683612465449>

Rust, W.F., Sharer, R.J., 1988. Olmec Settlement Data from La Venta, Tabasco, Mexico. *Science* 242, 102–104. <https://doi.org/10.1126/science.242.4875.102>

- S -

Sabloff, J.A., Bishop, R.L., Harbottle, C., Rands, R.L., & Sayre, E.V., 1975. Excavations at Seibal, Department of Peten, Guatemala. Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University.

Salard-Cheboldaeff, M., Dejax, J., 1991. Evidence of cretaceous to recent West African intertropical vegetation from continental sediment spore-pollen analysis. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)* 12, 353–361. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(91\)90084-C](https://doi.org/10.1016/0899-5362(91)90084-C)

Sánchez-Sánchez, O., Islebe, G.A., 2002. Tropical forest communities in southeastern Mexico. *Plant Ecology* 158, 183–200. <https://doi.org/10.1023/A:1015509832734>

Sánchez-Villagra, M.R., 2013. Why are There Fewer Marsupials than Placentals? On the Relevance of Geography and Physiology to Evolutionary Patterns of Mammalian Diversity and Disparity. *J Mammal Evol* 20, 279–290. <https://doi.org/10.1007/s10914-012-9220-3>

Sangster, A.G., 1970. Intracellular Silica Deposition in Mature and Senescent Leaves of *Sieglingia decumbens* (L.) Bernh. *Ann Bot* 34, 557–570. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084391>

Sangster, A.G., Parry, D.W., 1969. Some Factors in Relation to Bulliform Cell Silicification in the Grass Leaf. *Ann Bot* 33, 315–323. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084285>

Sangster, A.G., Hodson, M.J., Tubb, H.J., 2001. Silicon deposition in higher plants, in: Datnoff, L.E., Snyder, G.H., Korndörfer, G.H. (Eds.), *Studies in Plant Science, Silicon in Agriculture*. Elsevier, pp. 85–113. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80009-4)

Sanjur, O.I., Piperno, D.R., Andres, T.C., Wessel-Beaver, L., 2002. Phylogenetic relationships among domesticated and wild species of *Cucurbita* (Cucurbitaceae) inferred from a mitochondrial gene: Implications for crop plant evolution and areas of origin. *PNAS* 99, 535–540. <https://doi.org/10.1073/pnas.012577299>

Scarborough, V., Mitchum, B., Carr, S., Freidel, D., 1982. Two Late Preclassic Ballcourts at the Lowland Maya Center of Cerros, Northern Belize. *Journal of Field Archaeology* 9, 21–34. <https://doi.org/10.1179/009346982791974679>

Scarborough, V.L., Dunning, N.P., Tankersley, K.B., Carr, C., Weaver, E., Grazioso, L., Lane, B., Jones, J.G., Buttles, P., Valdez, F., Lentz, D.L., 2012. Water and sustainable land use at the ancient tropical city of Tikal, Guatemala. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 12408–12413. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202881109>

Schellart, W.P., Stegman, D.R., Farrington, R.J., Freeman, J., Moresi, L., 2010. Cenozoic Tectonics of Western North America Controlled by Evolving Width of Farallon Slab. *Science* 329, 316–319. <https://doi.org/10.1126/science.1190366>

- Schoelynck, J., Bal, K., Backx, H., Okruszko, T., Meire, P., Struyf, E.,** 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose? *New Phytologist* 186, 385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>
- Schultze, M.D. and Whitacre, D.F.,** 1999. A Classification and ordination of the tree community of Tikal National Park. Petén, Guatemala.
- Scott, J.C.,** 2019. *Homo domesticus: une histoire profonde des premiers Etats*. La Découverte.
- Sepulchre, P., Arsouze, T., Donnadieu, Y., Dutay, J.-C., Jaramillo, C., Bras, J.L., Martin, E., Montes, C., Waite, A.J.,** 2014. Consequences of shoaling of the Central American Seaway determined from modeling Nd isotopes. *Paleoceanography* 29, 176–189. <https://doi.org/10.1002/2013PA002501>
- Servigne, P., Stevens, R.,** 2015. *Comment tout peut s’effondrer: petit manuel de collapsologie à l’usage des générations présentes*. Éditions du Seuil, Paris.
- Sharer, R.J., Traxler, L.P.,** 2006. *The Ancient Maya*. Stanford University Press.
- Sheets, P., Dixon, C., Guerra, M., Blanford, A.,** 2011. Manioc cultivation at ceren, el salvador: occasional kitchen garden plant or staple crop ? *Ancient Mesoam* 22, 1–11. <https://doi.org/10.1017/S0956536111000034>
- Sheridan, R.E., Mullins, H.T., Austin, J.A., Ball, M.M., Ladd, J.W.,** 1988. Geology and geophysics of the Bahamas. In *The Geology of North America, The Atlantic continental margin*: Geological Society of America. (1–2), 329– 363.
- Shoka, D.,** 2006. *An Analysis of Tourist Preferences for the Development of Ecotourism in Uaxactún, Guatemala, Using Choice Experiment*. Mémoire de Master, Université du Michigan, p. 98.
- Sigloch, K., Mihalynuk, M.G.,** 2013. Intra-oceanic subduction shaped the assembly of Cordilleran North America. *Nature* 496, 50–56. <https://doi.org/10.1038/nature12019>
- Siemens, A.H., Puleston, D.E.,** 1972. Ridged Fields and Associated Features in Southern Campeche: New Perspectives on the Lowland Maya. *American Antiquity* 37, 228–239. <https://doi.org/10.2307/278209>
- Silva Neto, E.C. da, Calegari, M.R., Pereira, M.G., Maranhão, D.D.C., Schiavo, J.A., Fontana, A., Fernandes, J.C.F.,** 2018. Phytoliths as indicators of pedogenesis and paleoenvironmental changes in Spodosols of the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of The Total Environment* 636, 1070–1080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.313>
- Simpson, G.G.,** 1950. History of the fauna of latin america. *American Scientist* 38, 361–389.
- Simpson, T.L., Fell, P.E.,** 1974. Dormancy among the Porifera: Gemmule Formation and Germination in Fresh-Water and Marine Sponges. *Transactions of the American Microscopical Society* 93, 544. <https://doi.org/10.2307/3225157>
- Sion, J.,** 2016. *La caractérisation socio-économique des élites mayas au Classique terminal (800-950/1000 apr. J.C.) : le Groupe B-Sud de Naachtun (Guatemala)*. Thèse de Doctorat, Université Paris I Panthéon Sorbonne.
- Sluyter, A., Dominguez, G.,** 2006. Early maize (*Zea mays* L.) cultivation in Mexico: Dating sedimentary pollen records and its implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 1147–1151. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510473103>
- Smith, B.D.,** 1997. The Initial Domestication of *Cucurbita pepo* in the Americas 10,000 Years Ago. *Science* 276, 932–934. <https://doi.org/10.1126/science.276.5314.932>

- Smith, B.D.**, 1997b. Reconsidering the Ocampo Caves and the Era of Incipient Cultivation in Mesoamerica. *Latin American Antiquity* 8, 342–383. <https://doi.org/10.2307/972107>
- Smol, J.P., Stoermer, E.F.**, 2011. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences: 2nd Edition*, Cambridge University Press.
- Solís-Castillo, B., Golyeva, A., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., López-Rivera, S.**, 2015. Phytoliths, stable carbon isotopes and micromorphology of a buried alluvial soil in Southern Mexico: A polychronous record of environmental change during Middle Holocene. *Quaternary International, Paleosols, pedosediments and landscape morphology as environmental archives* 365, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.043>
- Soulié-Marsche, I.**, 2002. *Les Charophytes : biomarqueurs pour la reconstitution des paléoenvironnements lacustres. Géologie de la Préhistoire: méthodes, techniques, applications. Géopré: Presses Universitaires de Perpignan.*
- Spinden, H.J.**, 1928. *Ancient Civilizations of Mexico and Central America. Anthropological Handbook Fund.*, New York.
- Standley, P.C., Steyermark, J.A.**, 1946. *Flora of Guatemala. Natural History Museum Chicago, Chicago.*
- Stephens, J.L., Catherwood, F.**, 1991. *Aventure de voyage en pays maya. Pygmalion, Paris.*
- Steyermark, J.**, 1982. Relationship of some Venezuelan forest refuges with lowland tropical floras. *In Biological diversification in the tropics. Colombia University Press, New York.*
- Strömberg, C.A.E.**, 2002. The origin and spread of grass-dominated ecosystems in the late Tertiary of North America: preliminary results concerning the evolution of hypsodonty. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 177, 59–75. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00352-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00352-2)
- Strömberg, C.A.E.**, 2004. Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the great plains of North America during the late Eocene to early Miocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 207, 239–275. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2003.09.028>
- Strömberg, C.A.E.**, 2005. Decoupled taxonomic radiation and ecological expansion of open-habitat grasses in the Cenozoic of North America. *PNAS* 102, 11980–11984. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505700102>
- Strömberg, C.A.E.**, 2009. Methodological concerns for analysis of phytolith assemblages: Does count size matter? *Quaternary International* 193, 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.11.008>
- Strömberg, C.A.E., McInerney, F.A.**, 2011. The Neogene transition from C3 to C4 grasslands in North America: assemblage analysis of fossil phytoliths. *Paleobiology* 37, 50–71. <https://doi.org/10.1666/09067.1>
- Strömberg, C.A.E., Stilio, V.S.D., Song, Z.**, 2016. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective [WWW Document]. *Functional Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12692>
- Sun, G.**, 2002. Archaeofractaceae, a New Basal Angiosperm Family. *Science* 296, 899–904. <https://doi.org/10.1126/science.1069439>

Tainter, J.A., 1988. The collapse of complex societies, New studies in archaeology. Cambridge University Press, Cambridge, Cambridgeshire ; New York.

Tainter, J.A., 2013. L'effondrement des sociétés complexes. Le Retour aux sources, Paris.

Testé, M., Garnier, A., Limondin-Lozouet, N., Oxlaj, E., Castanet, C., Purdue, L., Lemonnier, E., Dussol, L., Non-dédéo, P., 2020. The phytoliths of Naachtun (Petén, Guatemala): Development of a modern reference for the characterization of plant communities in the Maya Tropical Lowlands. Review of Palaeobotany and Palynology 272, 104130. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.104130>

Thomas, R., 2011. Anatomie comparée des palmiers: Identification-assistée par ordinateur, Applications en paléobotanique et en archéobotanique. Thèse de Doctorat, Museum national d'Histoire naturelle, Paris.

Thompson, F. G. 2011. An annotated checklist and bibliography of the land and freshwater snails of México and Central America. Bulletin of the Florida Museum of Natural History 50, 1–299.

Thompson, J.E.S., 1980. Grandeur et décadence de la civilisation maya. Payot, Paris.

Thompson, K.M., Hood, A., Cavallaro, D., Lentz, D.L., 2015. Connecting Contemporary Ecology and Ethnobotany to Ancient Plant Use Practices of the Maya at Tikal [WWW Document]. Tikal: Paleocology of an Ancient Maya City. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139227209.008>

Thompson, R.G., Hart, J.P., Brumbach, H.J., Lusteck, R., 2004. Phytolith evidence for twentieth-century BP maize in northern Iroquoia. Northeast Anthropology, 68, 25-40.

Thorn, V.C., 2004. Phytolith evidence for C4-dominated grassland since the early Holocene at Long Pocket, northeast Queensland, Australia. Quat. res. 61, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.12.002>

Toledo, V.M., 1982. Pleistocene changes of vegetation in tropical Mexico. In *Biological diversification in the tropics*. Columbia University Press, New York.

Tomlinson, P.B., 1961. Anatomy of the monocotyledons, vol. 2: Palmae. Clarendon Press : Oxford University.

Torrescano-Valle, N., Islebe, G.A., 2015. Holocene paleoecology, climate history and human influence in the southwestern Yucatan Peninsula. Review of Palaeobotany and Palynology 217, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.03.003>

Tortosa, T., 2013. Principes de paléontologie. Dunod, Paris.

Tovar, R.E., Sedov, S., Montellano-Ballesteros, M., Solleiro, E., Benammi, M., 2014. Paleosols, bones, phytoliths, and $\delta^{13}\text{C}$ signatures of humus and teeth in the alluvial sequence of Axamilpa, Puebla: Inferences for landscape evolution and megafauna paleoecology during MIS 3–2 in Southern Mexico. CATENA, Landscapes and Soils through Time 112, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.015>

Trombold, C.D., Israde-Alcantara, I., 2005. Paleoenvironment and plant cultivation on terraces at La Quemada, Zacatecas, Mexico: the pollen, phytolith and diatom evidence. Journal of Archaeological Science 32, 341–353. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.10.005>

Tucker, S.C., 1977. Foliar sclereids in the Magnoliaceae. Botanical Journal of the Linnean Society 75, 325–356. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1977.tb01492.x>

Turner, B.L., 1974. Prehistoric Intensive Agriculture in the Mayan Lowlands. *Science* 185, 118–124. <https://doi.org/10.1126/science.185.4146.118>

Turner, B.L., Harrison, P.D., 1981. Prehistoric Raised-Field Agriculture in the Maya Lowlands. *Science* 213, 399–405. <https://doi.org/10.1126/science.213.4506.399>

Turner, B.L., Sabloff, J.A., 2012. Classic Period collapse of the Central Maya Lowlands: Insights about human-environment relationships for sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 13908–13914. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210106109>

Twiss, P.C., 1992. Predicted World Distribution of C3 and C4 Grass Phytoliths, in: Rapp, G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues*, Advances in Archaeological and Museum Science. Springer US, Boston, MA, pp. 113–128. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1_6

Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M., 1969. Morphological Classification of Grass Phytoliths1. *Soil Science Society of America Journal* 33, 109. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300010030x>

- U -

Uba, C.E., Strecker, M.R., Schmitt, A.K., 2007. Increased sediment accumulation rates and climatic forcing in the central Andes during the late Miocene. *Geology* 35, 979–982. <https://doi.org/10.1130/G224025A.1>

- V -

Van Der Hammen, T., 1988. South America. In *Vegetation history*, Springer, Dordrecht.

Van der Hammen, T., Wymstra, T.A., 1964. A palynological study on the Tertiary and Upper Cretaceous of British Guiana. *Leidse Geologische Mededelingen* 30, 183-241.

Van der Hammen, T., Garcia, C., 1966. The Paleocene pollen flora of Colombia. *Leidse Geologische Mededelingen* 35, 105-114.

Van Der Merwe, N.J., Tykot, R.H., Hammond, N., Oakberg, K., 2002. Diet and Animal Husbandry of the Preclassic Maya at Cuello, Belize: Isotopic and Zooarchaeological Evidence, in: Ambrose, S.H., Katzenberg, M.A. (Eds.), *Bio-geochemical Approaches to Paleodietary Analysis*, Advances in Archaeological and Museum Science. Springer US, Boston, MA, pp. 23–38. https://doi.org/10.1007/0-306-47194-9_2

Van der Vorm, P.D.J., 1980. Uptake of Si by five plant species, as influenced by variations in Si-supply. *Plant Soil* 56, 153–156. <https://doi.org/10.1007/BF02197962>

Vaughan, H.H., Deevey, E.S., Garrett-Jones, S.E., 1985. Pollen stratigraphy of two cores from the Peten Lake District. In *Prehistoric lowland Maya environment and subsistence economy*. Cambridge, Harvard University Press.

Vermeij, G.J., Covich, A.P., 1978. Coevolution of Freshwater Gastropods and Their Predators. *The American Naturalist* 112, 833–843. <https://doi.org/10.1086/283326>

Vidal-Zepeda, R., 2005. Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía, UNAM, México, *Temas Selectos de Geografía de México*.

Villar Anléu, L. (2008) La flora silvestre de Guatemala. Editorial Universiacion de Universidad, San Carlos de Guatemala.

Von Mohl, H., 1861. Uber das Kieselskelett lebender Pflanzenzellen. Bot. Ztg. 19, 209–215.

Vrydaghs, L., Ball, T., Volkaert, H., Van den Houwe, I., Manwaring, J., De Langhe, E., 2009. Differentiating the Volcaniform Phytoliths of Bananas: *Musa acuminata*. Ethnobot. Res. App. 7, 239. <https://doi.org/10.17348/era.7.0.239-246>

- W -

Wadge, G., Burke, K., 1983. Neogene Caribbean Plate rotation and associated Central American tectonic evolution. Tectonics 2, 633–643. <https://doi.org/10.1029/TC002i006p00633>

Wahl, D., Byrne, R., Schreiner, T., Hansen, R., 2006. Holocene vegetation change in the northern Peten and its implications for Maya Prehistory. Quaternary Research 65, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.10.004>

Wahl, D., Byrne, R., Schreiner, T., Hansen, R., 2007. Palaeolimnological evidence of late-Holocene settlement and abandonment in the Mirador Basin, Peten, Guatemala. The Holocene 17, 813–820. <https://doi.org/10.1177/0959683607080522>

Wahl, D., Estrada-Belli, F., Anderson, L., 2013. A 3400 year paleolimnological record of prehispanic human–environment interactions in the Holmul region of the southern Maya lowlands. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 379–380, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.03.006>

Wahl, D., Byrne, R., Anderson, L., 2014. An 8700 year paleoclimate reconstruction from the southern Maya lowlands. Quaternary Science Reviews 103, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.08.004>

Wahl, D., Hansen, R.D., Byrne, R., Anderson, L., Schreiner, T., 2016. Holocene climate variability and anthropogenic impacts from Lago Paixban, a perennial wetland in Peten, Guatemala. Global and Planetary Change 138, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.011>

Wallis, L., 2001. Environmental history of northwest Australia based on phytolith analysis at Carpenter’s Gap 1. Quaternary International, Australian Quaternary Studies: A Tribute to Jim Bowler 83–85, 103–117. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00033-7)

Wallis, L., 2003. An overview of leaf phytolith production patterns in selected northwest Australian flora. Review of Palaeobotany and Palynology 125, 201–248. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(03\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(03)00003-4)

Walsh, M.K., Prufer, K.M., Culleton, B.J., Kennett, D.J., 2014. A late Holocene paleoenvironmental reconstruction from Agua Caliente, southern Belize, linked to regional climate variability and cultural change at the Maya polity of Uxbenká. Quaternary Research 82, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.01.013>

Wang, L., Nie, Q., Li, M., Zhang, F., Zhuang, J., Yang, W., Li, T., Wang, Y., 2005. Biosilicified structures for cooling plant leaves: A mechanism of highly efficient midinfrared thermal emission. Appl. Phys. Lett. 87, 194105. <https://doi.org/10.1063/1.2126115>

Waters, M.R., Forman, S.L., Jennings, T.A., Nordt, L.C., Driese, S.G., Feinberg, J.M., Keene, J.L., Halligan, J., Lindquist, A., Pierson, J., Hallmark, C.T., Collins, M.B., Wiederhold, J.E., 2011. The Buttermilk Creek Complex

- and the Origins of Clovis at the Debra L. Friedkin Site, Texas. *Science* 331, 1599–1603. <https://doi.org/10.1126/science.1201855>
- Watling, J., Iriarte, J.**, 2013. Phytoliths from the coastal savannas of French Guiana. *Quaternary International, Comprehensive Perspectives on Phytolith Studies in Quaternary Research* 287, 162–180. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.10.030>
- Watling, J., Saunaluoma, S., Pärssinen, M., Schaan, D.**, 2015. Subsistence practices among earthwork builders: Phytolith evidence from archaeological sites in the southwest Amazonian interfluves. *Journal of Archaeological Science: Reports* 4, 541–551. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.10.014>
- Watling, J., Iriarte, J., Whitney, B.S., Consuelo, E., Mayle, F., Castro, W., Schaan, D., Feldpausch, T.R.**, 2016. Differentiation of neotropical ecosystems by modern soil phytolith assemblages and its implications for palaeo-environmental and archaeological reconstructions II: Southwestern Amazonian forests. *Review of Palaeobotany and Palynology* 226, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.12.002>
- Watling, J., Iriarte, J., Mayle, F.E., Schaan, D., Pessenda, L.C.R., Loader, N.J., Street-Perrott, F.A., Dickau, R.E., Damasceno, A., Ranzi, A.**, 2017. Impact of pre-Columbian “geoglyph” builders on Amazonian forests. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 1868–1873. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614359114>
- Wauchope, R.**, 1962. *Lost tribes & sunken continents: myth and method in the study of American Indians*. University of Chicago Press, pp. Chicago.
- Wayne, R., Leonard, J.A., Vila, C.**, 2006. Genetic analysis of dog domestication. *In Documenting domestication : new genetic and archaeological paradigms*. University of California Press, Berkeley.
- Webb, D.S.**, 2006. The great american biotic interchange: patterns and processes. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93, 245–257. [https://doi.org/10.3417/0026-6493\(2006\)93\[245:TGABIP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3417/0026-6493(2006)93[245:TGABIP]2.0.CO;2)
- Webb, E.A., Schwarcz, H.P., Healy, P.F.**, 2004. Detection of ancient maize in lowland Maya soils using stable carbon isotopes: evidence from Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science* 31, 1039–1052. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.01.001>
- Webster, D.L.**, 2002. *The fall of the ancient Maya: solving the mystery of the Maya collapse*. Thames & Hudson, London.
- Webster, J.W., Brook, G.A., Railsback, L.B., Cheng, H., Edwards, R.L., Alexander, C., Reeder, P.P.**, 2007. Stalagmite evidence from Belize indicating significant droughts at the time of Preclassic Abandonment, the Maya Hiatus, and the Classic Maya collapse. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 250, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.022>
- Welle, B.J.H. ter.**, 1976. Silica grains in woody plants of the Neotropics, especially Surinam. *Leiden Botanical Series* 3, 42–107.
- Weyl, R.**, 1980. *Geology of Central America*. Berlin, Gebruder Borntraeger.
- White, C.D., Healy, P.F., Schwarcz, H.P.**, 1993. Intensive Agriculture, Social Status, and Maya Diet at Pacbitun, Belize. *Journal of Anthropological Research* 49, 347–375. <https://doi.org/10.1086/jar.49.4.3630154>
- Whitney, B.S., Dickau, R., Mayle, F.E., Walker, J.H., Soto, J.D., Iriarte, J.**, 2014. Pre-Columbian raised-field agriculture and land use in the Bolivian Amazon. *The Holocene* 24, 231–241. <https://doi.org/10.1177/0959683613517401>

Wilbur, C.C., 2013. A History of Place: Using Phytolith Analysis to Discern Holocene Vegetation Change on Sanak Island, Western Gulf of Alaska. Antioch University.

Wilding, L.P., Drees, L.R., 1973. Scanning Electron Microscopy of Opaque Opaline Forms Isolated from Forest Soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal* 37, 647.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040047x>

Wilkinson, R.L., 1994. Yellow fever: Ecology, epidemiology, and role in the collapse of the Classic lowland Maya civilization. *Medical Anthropology* 16, 269–294. <https://doi.org/10.1080/01459740.1994.9966118>

Wiley, G.R., Phillips, P., 1958. Method and theory in American archaeology. The University of Chicago Press, Chicago.

Wilson, E.M., 1980. Physical geography of the Yucatan Peninsula. Yucatan: A world apart. University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Witschey, W.R. & Brown, C.T., 2014. 5,000 Sites and Counting. *In* The Ancient Maya of Mexico: Reinterpreting the Past of the Northern Maya Lowlands. Routledge.

Wolfe, J. A., 1985. Distribution of major vegetational types during the Tertiary. *In* The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variations Archean to present. Geophysical Monograph, Washington D.C. American Geophysical Union 32, 357-375.

Wooller, M.J., Zazula, G.D., Blinnikov, M., Gaglioti, B.V., Bigelow, N.H., Sanborn, P., Kuzmina, S., Farge, C.L., 2011. The detailed palaeoecology of a mid-Wisconsinan interstadial (ca. 32 000 14C a BP) vegetation surface from interior Alaska. *Journal of Quaternary Science* 26, 746–756. <https://doi.org/10.1002/jqs.1497>

Wu, H.C., Felis, T., Scholz, D., Giry, C., Kölling, M., Jochum, K.P., Scheffers, S.R., 2017. Changes to Yucatán Peninsula precipitation associated with salinity and temperature extremes of the Caribbean Sea during the Maya civilization collapse. *Scientific Reports* 7, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15942-0>

Wu, Y., You, H.-L., Li, X.-Q., 2018. Dinosaur-associated Poaceae epidermis and phytoliths from the Early Cretaceous of China. *Natl Sci Rev* 5, 721–727. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx145>

- Y -

Yost, C.L., Blinnikov, M.S., 2011. Locally diagnostic phytoliths of wild rice (*Zizania palustris* L.) from Minnesota, USA: comparison to other wetland grasses and usefulness for archaeobotany and paleoecological reconstructions. *Journal of Archaeological Science* 38, 1977–1991. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.04.016>

Yost, C.L., Blinnikov, M.S., Julius, M.L., 2013. Detecting ancient wild rice (*Zizania* spp. L.) using phytoliths: a taphonomic study of modern wild rice in Minnesota (USA) lake sediments. *J Paleolimnol* 49, 221–236. <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9670-x>

- Z -

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292, 686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>

Zhang, J., Lu, H., Wu, N., Qin, X., Wang, L., 2013. Palaeoenvironment and agriculture of ancient Loulan and Milan on the Silk Road. *The Holocene* 23, 208–217. <https://doi.org/10.1177/0959683612455541>

Zizumbo-Villarreal D, Papa R, Hufford M, Repinski S, Gepts, P., 2009. Identification of a new wild population of *Phaseolus vulgaris* L. in western Jalisco, Mexico, near the Mesoamerican domestication center of common bean. *BIC* 52:24-25. <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND44207056/PDF>

Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-GarcíaMarín, P., 2010. Origin of agriculture and plant domestication in West Mesoamerica. *Genet Resour Crop Evol* 57, 813–825. <https://doi.org/10.1007/s10722-009-9521-4>

Zucol, A.F., Brea, M., Scopel, A., 2005. First record of fossil wood and phytolith assemblages of the Late Pleistocene in El Palmar National Park (Argentina). *Journal of South American Earth Sciences, Quaternary Paleontology and biostratigraphy of southern South Africa* 20, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.07.007>

Zurro, D., 2018. One, two, three phytoliths: assessing the minimum phytolith sum for archaeological studies. *Archaeol Anthropol Sci* 10, 1673–1691. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0479-4>

