



**HAL**  
open science

# Découvrir et occuper un archipel : dynamique des relations des premiers peuplements du Vanuatu avec leur milieu naturel – étude palynologique de dépôts holocènes.

Claire Combettes

## ► To cite this version:

Claire Combettes. Découvrir et occuper un archipel : dynamique des relations des premiers peuplements du Vanuatu avec leur milieu naturel – étude palynologique de dépôts holocènes. . Archéologie et Préhistoire. Muséum National d'Histoire Naturelle, 2016. Français. NNT : . tel-01298232

**HAL Id: tel-01298232**

**<https://theses.hal.science/tel-01298232v1>**

Submitted on 7 Apr 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

**MUSEUM NATIONAL**



**D'HISTOIRE NATURELLE**

**Ecole Doctorale Sciences de la Nature et de l'Homme – ED 227**

**Année 2016**

**N°attribué par la bibliothèque**

|||||

## **THÈSE**

**Pour obtenir le grade de**

**DOCTEUR DU MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE**

**Spécialité :**

**Archéologie et Paléoenvironnement**

**Présentée et soutenue publiquement par**

**Claire Combettes**

**Le 11 février 2016**

---

**Découvrir et occuper un archipel : dynamique des relations des premiers peuplements du Vanuatu avec leur milieu naturel – étude palynologique de dépôts holocènes**

---

**Sous la direction de : Mme Anne-Marie et M. François Sémah**

**JURY :**

|                               |                                                                                                           |                                   |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Mme GUILLAUD Dominique</b> | <b>Directrice de Recherche, Muséum national d'histoire naturelle, Paris (075)</b>                         | <b>Présidente et Examinatrice</b> |
| <b>Mme SÈMAH Anne-Marie</b>   | <b>Directrice de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement, Bondy (093)</b>                  | <b>Directrice de Thèse</b>        |
| <b>M. SÈMAH François</b>      | <b>Directeur de Recherche, Muséum national d'histoire naturelle, Paris (075)</b>                          | <b>Directeur de thèse</b>         |
| <b>M. HABERLE Simon</b>       | <b>Professor, Australian National University Canberra, Australie</b>                                      | <b>Rapporteur</b>                 |
| <b>M. PAZ Victor</b>          | <b>Professor, University of the Philippines, Philippines</b>                                              | <b>Rapporteur</b>                 |
| <b>M. MUNZINGER Jérôme</b>    | <b>Chargé de Recherche, Laboratoire de Botanique et d'Écologie végétale appliquées, Montpellier (034)</b> | <b>Examineur</b>                  |





*« Leur industrie paraît davantage dans le moyen dont ils usent pour rendre ces bâtiments [pirogues] propres à les transporter aux îles voisines. Ils lient ensemble deux grandes pirogues côte à côte, ... par le moyen de quelques traverses fortement amarrées sur les deux bords. Par-dessus l'arrière de ces deux bâtiments ainsi joints, ils posent un pavillon d'une charpente ..., couvert par un toit de roseaux. Cette chambre les met à l'abri de la pluie et du soleil, et leur fournit un lieu propre à tenir leurs provisions sèches. Ces doubles pirogues sont capables de contenir un grand nombre de personnes, et ne risquent jamais de chavirer. »*

Description des embarcations polynésiennes. Louis-Antoine de Bougainville, Voyage autour du monde, 1771



Le marais d'Emaotfer depuis la rive ouest. Crédit Photo : Claire Combettes

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Christophe Falguères, directeur du Département de Préhistoire (UMR 7194 – Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique) au Muséum national d'histoire naturelle, qui m'a fait confiance en me permettant de réaliser cette thèse. Je souhaite aussi remercier M. Bruno Turcq et M. David Williamson, directeurs de l'équipe Biogéochimie - Traceurs – Paléoclimats (UMR 7159 – LOCEAN), qui m'ont accueillie pendant toute la durée de ma thèse dans leur équipe et qui ont mis à ma disposition les locaux et le matériel nécessaire à la bonne réalisation de mes travaux.

Cette thèse n'est pas seulement le résultat de mon travail, mais également de celui de mes encadrants, Anne-Marie et François Sémah. Je les remercie de m'avoir soutenue dans ma recherche durant ces 3 dernières années. En particulier, merci Anne-Marie d'avoir été à l'écoute, disponible et présente, de m'avoir guidée avec beaucoup de justesse dans mes recherches. Merci aussi pour ton soutien et ta réactivité dans le rush final de la rédaction de ce manuscrit !

Je voudrais également remercier les membres de mon jury Victor Paz, Simon Haberle, Dominique Guillaud et Jérôme Munzinger, d'avoir accepté d'examiner mon travail malgré leur emploi du temps chargé. Merci également à Anne-Marie Lézine et Denis Wirmann d'avoir fait partie de mon comité de thèse, ainsi que pour votre accompagnement. En particulier, je remercie Denis pour ses précieux conseils et son aide importante lors de la rédaction de mon article.

Je tiens à remercier Laurent Bremont et Sandrine Canal Subitani, du Centre de Bioarchéologie et d'Écologie de Montpellier (UMR 5059), pour m'avoir initiée au comptage de charbons avec le logiciel Winseedle et de s'être occupés de mes échantillons, malgré la difficulté à les réhydrater lors des traitements chimiques ! Merci aussi de m'avoir montré comment interpréter la quantité impressionnante de données issues du comptage.

La mission de terrain d'octobre-novembre 2013 au Vanuatu et en Nouvelle-Calédonie n'aurait pas été possible sans la contribution des personnes présentes sur place. J'ai ainsi une pensée particulière pour M. Monvoisin, propriétaire du terrain sur lequel se trouve le marais d'Emaotfer, qui nous a permis d'accéder au site. Je remercie également l'équipe de l'herbier de Port Vila, au Vanuatu, et surtout Chanel Sam, pour les discussions plus qu'utiles autour des déterminations botaniques, ainsi que M Philippe Liege, de l'Ambassade de France au Vanuatu, pour son accueil et ses conseils sur l'organisation administrative de notre mission. Mes sincères remerciements vont à Mme Donna Kalfatak, du Dept. Environmental Protection and Conservation Vanuatu, pour son aide administrative apportée au moment du travail de terrain en 2005 et 2007, qui a permis de rapporter les carottes récoltées à Santo, Efate et Tanne, et pour ses recommandations au moment de notre venue en 2013. Merci aussi à Pierre Voisin pour sa gentillesse, son accueil à l'aéroport de Nouméa, pour m'avoir fait partager ses connaissances et m'avoir fait rêver et rire avec ses anecdotes de bourlingueur.

La collection de référence est en grande partie réalisée grâce à l'herbier IRD de Nouméa. Je tiens à remercier Sandrine Isnard, la responsable de l'AMAP, pour nous avoir permis de prélever dans les collections, et surtout Jacqueline Fambart-Tinel, la curatrice de l'herbier, pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Je remercie Thierry Deroin, pour m'avoir accueillie à l'herbier de Paris et m'avoir permis l'accès aux immenses collections des plantes vasculaires du Muséum national d'histoire naturelle. Merci aussi pour la petite visite de la palynothèque, la xylothèque et l'acoolthèque !

Un grand merci à Anastase Charantonis, docteur de l'équipe PARVATI du LOCEAN, pour m'avoir beaucoup aidée en statistiques, pour les ACP multiples sur Matlab et les reconstructions paléoclimatiques. Merci de m'avoir expliqué de façon simple des notions complexes qui m'étaient auparavant obscures.

Je voudrais également remercier :

- Aurélie Salavert pour ses réunions des Joyeux Botanistes et les réflexions multidisciplinaires que cela a amené ;
- la petite équipe de Bondy : Magloire Mandeng-Yogo (pour s'être occupé de mes datations), Nathalie Ortlieb (pour les commandes !), Sandrine Caquineau, Florence Le Cornec, Mercedes Mendez, Irina Djouraeve, Fethiye Cetin, Kévin Lemonnier, Thierry Pilorge, Hugues Boucher, Claire Lazareth, ... pour leur accueil, leur bonne humeur et leur disponibilité ;
- mes compagnons de thèse : mes voisines de bureau Julie, puis Fantine qui a pris le relais en octobre, les étudiants de Bondy (Nicolas, Sevahnee, Anaïs, Aurélie, Henri...) et Mailys (à l'IPH) pour les moments passés ensemble et pour les discussions ...scientifiques ou non.

Mes remerciements vont également à tout le personnel technique et administratif de l'IPH pour leur concours et disponibilité.

Ce travail a bénéficié du concours financier de la région IDF, du MNHN, des associations APLF et AFEQ et du groupe Pacifique Ouest de l'équipe BTP qui m'ont permis d'aller sur le terrain en 2013, de participer à différents colloques et donc d'avancer dans ma recherche et ma réflexion.

Un grand merci à ma famille et mes amis, qui ont contribué de manière plus ou moins directe à cette thèse, pour la relecture des certaines parties du manuscrit, pour les week-ends dans le Nord, à Paris ou ailleurs, ou tout simplement pour le soutien sans faille durant ces 3 ans. Merci donc à mes parents, Klem, Maé, Raph (le blond), Sophie, Marie, Mathieu, Élo, Akiyo, Cyrille, Lisa, Raph et Julien.

Et enfin, mes remerciements les plus forts vont à Guillaume, qui m'a beaucoup aidé, supportée et donné toute son attention durant ce parcours



## SOMMAIRE

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduction</b>                                                            | 1  |
| <b>Première Partie : Cadre de l'étude (voir aussi Article I)</b>               | 7  |
| 1. Contexte régional de l'archipel du Vanuatu                                  | 7  |
| 1.1. Géologie et Géomorphologie                                                | 7  |
| 1.2. Le climat                                                                 | 9  |
| 1.3. La végétation                                                             | 12 |
| 2. Occupations préhistoriques du Vanuatu et d'Efate                            | 13 |
| 2.1. Les premières migrations                                                  | 13 |
| 2.2. Installations permanentes                                                 | 17 |
| 2.3. Influence de la culture polynésienne                                      | 18 |
| 3. Impacts des phénomènes naturels et anthropiques sur la végétation           | 19 |
| 3.1. Les variations climatiques                                                | 19 |
| 3.2. Feux naturels et anthropiques                                             | 22 |
| 3.3. Impact de la tectonique et du volcanisme sur la végétation                | 24 |
| 3.4. Les activités humaines                                                    | 25 |
| <b>Deuxième Partie : Méthodologie</b>                                          | 31 |
| 1. Échantillonnage des carottes                                                | 31 |
| 2. Datation radiocarbone                                                       | 31 |
| 2.1. Datation du sédiment                                                      | 31 |
| 2.2. Datation du matériel sporopollinique                                      | 32 |
| 2.3. Réalisation d'un modèle d'âge                                             | 33 |
| 3. Analyse palynologique                                                       | 34 |
| 3.1. Production, dispersion et conservation des grains de pollen et des spores | 34 |

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2. Traitements chimiques                                                               | 35        |
| 3.3. Détermination du matériel                                                           | 37        |
| 3.4. Diagrammes polliniques et interprétations                                           | 38        |
| 3.5. Représentation des résultats                                                        | 40        |
| 3.6. Traitements statistiques                                                            | 42        |
| 3.6.1. Analyse cluster                                                                   | 42        |
| 3.6.2. Analyse en Composante Principale (biplot)                                         | 43        |
| 3.6.3. Quantification climatique                                                         | 44        |
| 4. Analyse des micro-charbons                                                            | 46        |
| 4.1. Production, dispersion et conservation des micro-charbons                           | 46        |
| 4.2. Traitements chimiques                                                               | 47        |
| 4.3. Détermination du matériel                                                           | 47        |
| 4.4. Interprétation                                                                      | 48        |
| 4.5. Représentation des résultats                                                        | 49        |
| 5. Analyses des phytolithes et des grains d'amidon                                       | 50        |
| 5.1. Production, dispersion et conservation des phytolithes et des grains d'amidon       | 50        |
| 5.1.1. Production des phytolithes                                                        | 50        |
| 5.1.2. Production des grains d'amidon                                                    | 50        |
| 5.1.3. Dispersion et conservation des phytolithes et des grains d'amidon                 | 51        |
| 5.2. Traitements chimiques                                                               | 51        |
| 5.3. Détermination du matériel                                                           | 52        |
| <br>                                                                                     |           |
| <b>Troisième Partie : Résultats des analyses</b>                                         | <b>55</b> |
| <br>                                                                                     |           |
| 1. La carotte Tfer06                                                                     | 55        |
| 1.1. Lithologie de la carotte et choix des échantillons                                  | 55        |
| 1.2. Modèle d'âge-profondeur de la carotte Tfer06                                        | 56        |
| 1.3. Résultats de l'analyse des mousses                                                  | 59        |
| 1.4. Résultats de l'analyse des grains de pollen, des phytolithes et des grains d'amidon | 63        |

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.5. Résultats de l'analyse des micro-charbons                                                                             | 68        |
| 2. La carotte Ota2                                                                                                         | 72        |
| 2.1. Lithologie de la carotte et choix des échantillons                                                                    | 72        |
| 2.2. Modèle d'âge-profondeur de la carotte Ota2                                                                            | 73        |
| 2.3. Résultats de l'analyse des grains de pollen et des micro-charbons                                                     | 74        |
| <br>                                                                                                                       |           |
| <b>Quatrième partie : Interprétations et discussions</b>                                                                   | <b>81</b> |
| <br>                                                                                                                       |           |
| 1. Spécificités des paléoenvironnements d'Emaotfer et d'Otas                                                               | 81        |
| 1.1. Particularités du paléoenvironnement du marais d'Emaotfer                                                             | 81        |
| 1.1.1. Données sédimentologiques                                                                                           | 81        |
| 1.1.2. Données palynologiques et de micro-faune                                                                            | 81        |
| 1.1.3. Analyses statistiques ACP                                                                                           | 83        |
| 1.2. Particularités du paléoenvironnement du lac Otas                                                                      | 87        |
| 1.2.1. Données sédimentologiques et de microfaune                                                                          | 87        |
| 1.2.2. Données palynologiques                                                                                              | 88        |
| 1.2.3. Analyses statistiques ACP                                                                                           | 89        |
| 2. Influence des évènements naturels et des activités humaines sur la végétation à l'Holocène supérieur au Vanuatu central | 92        |
| 2.1. Réponse de la végétation aux changements naturels à l'Holocène supérieur                                              | 92        |
| 2.1.1. Cas du marais d'Emaotfer (voir aussi Article II)                                                                    | 92        |
| 2.1.2. Cas du lac Otas                                                                                                     | 104       |
| 2.2. Impact des activités humaines sur la diversité végétale du Vanuatu                                                    | 107       |
| 2.2.1. Une population Lapita navigatrice                                                                                   | 107       |
| 2.2.2. Des populations post-Lapita sédentaires ( voir aussi Article II)                                                    | 111       |
| 3. Migrations et adaptation des populations porteuses des cultures Lapita et Post-Lapita                                   | 115       |
| 3.1. Conséquences du climat sur les déplacements de populations de la période Lapita                                       | 116       |
| 3.2. Adaptations à des îles vierges et aménagements du territoire                                                          | 118       |
| 4. Synthèse de la discussion                                                                                               | 123       |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>Summary of the manuscript</b> | 135 |
| <b>Conclusion</b>                | 149 |
| <b>Bibliographie</b>             | 155 |
| <b>Résumés</b>                   | 186 |
| <b>Abstract</b>                  | 187 |
| <b>Glossaire</b>                 | 188 |

### **Articles**

Article I : Combettes C., soumis. Les environnements du Vanuatu de l'Holocène à nos jours : Un état des lieux des connaissances

Article II : Combettes C., Sémah, A-M., Wirmann, D., 2015. High-resolution pollen record from Efate Island, central Vanuatu: Highlighting climatic and human influences on Late Holocene vegetation dynamics. *Comptes Rendus Palévol* 14, 251-261.

### **Annexes**

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

### FIGURES AND TABLES LIST

#### **Première partie : Cadre de l'étude**

- Figure 1 : Localisation de l'archipel du Vanuatu et des sites où ont été prélevées les carottes Tfer06 et Ota2/ *Location of the Vanuatu Archipelago and the sites where cores Tfer06 and Ota2 were collected* 8
- Figure 2 : Carte géologique simplifiée d'Efate et des îles alentours/ *Geological map of Efate and the surroundings islands* 10
- Figure 3 : Diagrammes ombrothermiques des différentes régions d'Efate/ *Ombrothermic diagrams of the different areas of Efate* 11
- Figure 4 : Distribution de la végétation sur Efate et les îles alentours/ *Vegetation distribution on Efate and the surroundings islands* 13
- Figure 5 : Principales routes de migrations dans le Pacifique sud-ouest depuis le Pléistocène. Les dates correspondent aux sites archéologiques les plus anciens de chaque région/ *Main migration roads in the south-west Pacific since the Pleistocene. The dates correspond to the most ancient archaeological sites for each area* 14
- Figure 6 : Les sites archéologiques d'Efate et des îles alentours/ *The archaeological sites in Efate and the surroundings islands* 16
- Figure 7 : Évènements ENSO et variations environnementales holocènes dans la région du Pacifique sud-ouest. Des changements dans la végétation illustrant un climat plus sec sont enregistrés en majorité entre 3500 et 1300 ans BP/ *Holocene ENSO events and environmental changes in the south-west Pacific area. Vegetation dynamics indicating a drier climate are mostly recorded between 3500 to 1300 years BP* 21
- Figure 8 : Paléovégétation avant et après l'arrivée de l'Homme sur quatre îles du Pacifique sud-ouest. Afin de faciliter la comparaison entre les sites, les courbes de charbons exposent des données qualitatives (absence/présence de feux)/ *Paleovegetation before and after the human arrival on four islands of the south-west Pacific. For ease of comparison, the charcoal curves only expose qualitative data (fires absence/occurrence)* 29

## Deuxième partie : Méthodologie

- Figure 1 : Grains de pollen de *Mallotus*, *Macaranga* actuels et grains de pollen d'Euphorbiaceae fossiles. La comparaison de taille, la morphologie et l'absence de *Mallotus* dans le relevé botanique nous fait supposer que le pollen fossile en photo est *Macaranga*. Ces deux genres ont les mêmes exigences écologiques/*Pollen grains of Mallotus and Macaranga from the reference collection and fossil Euphorbiaceae. The comparison of size, morphology, and the absence of Mallotus in the botanical survey indicate that the fossil pollen could be Macaranga. These two genera have the same ecological needs* 39
- Figure 2 : Principe de la quantification climatique/*Climatic quantification principle* 45
- Figure 3 : Séparation par densimétrie des grains d'amidon et des phytolithes/*Densimetric separation of starch grains and phytoliths* 53

## Troisième partie : Résultats des analyses

- Figure 1 : Lithologie et modèle d'âge-profondeur de la carotte Tfer06. Les dates calibrées (sauf celles avec les astérisques dans le tableau 1) sont ajustées par une courbe lissée polynomiale afin de réaliser le modèle/*Lithology and age-depth model of core Tfer06. The age-depth model is undertaken by fitting a polynomial smoothed curve through the calibrated ages, without the dates asterisked (see table 1)* 58
- Figure 2 : Localisation de la carotte Tfer06, des trois mousses étudiées pour cette thèse et de la végétation autour du site/*Location of core Tfer06, three mosses studied for this thesis and the vegetation around the site* 60
- Figure 3 : Diagrammes en secteurs des trois mousses prélevées près du marais d'Emaotfer/*Sector diagrams of the three mosses sampled near the Emaotfer Swamp* 61
- Figure 4 : Diagramme synthétique de la carotte Tfer06. Le rectangle bleu correspond à une zone extrêmement riche en grains de pollen de *Piper* et *Macropiper*. Dans cette zone, les deux taxons n'ont pas été pris en compte dans le calcul des pourcentages/*Synthetic diagram of core Tfer06. The blue rectangle corresponds to an extremely rich Piper and Macropiper pollen grains area. In this zone the two taxa were not taken into account in the percentages calculation.* 64

Figure 5 : Agrandissement du rectangle bleu de la figure 4. Les étoiles marquent la présence de l'espèce *Piper methysticum*/Zoom on the blue rectangle of the figure 4. The stars mark the occurrence of the *Piper methysticum* species 67

Figure 6 : Courbes de la concentration en charbons (particules > et < à 160 µm), de la surface moyenne et du rapport W/L pour les particules > 160 µm/Charcoal concentration curves (> and < 160 µm particles), average surface and W/L ratio (for > 160 µm particles) curves 70

Figure 7 : photos de charbons > 160 µm, prélevés à 97,5, 101,5 et 106,5 cm de profondeur/Pictures of charcoal > 160 µm, collected from 97.5, 101.5 and 106.5 cm depth 71

Figure 8 : Localisation de la carotte Ota2 et de la végétation autour du site/Location of core Ota2 and the vegetation around the site 73

Figure 9 : Lithologie et modèle d'âge profondeur de la carotte Ota2. Les dates calibrées (sauf celles avec les astérisques dans le tableau 2) sont ajustées par une courbe lissée polynomiale afin de réaliser le modèle/Lithology and age-depth model of core Ota2. The age-depth model is undertaken by fitting a polynomial smoothed curve through the calibrated ages, without the dates asterisked (see table 2) 75

Figure 10 : Diagramme synthétique de la carotte Ota2, comprenant les grains de pollen et les micro-charbons de taille inférieure à 160 µm. L'accolade regroupe tous les échantillons datés d'après le modèle d'âge-profondeur à 600 ans cal BP/Synthetic pollen and micro-charcoal (< 160 µm) diagram of core Ota2. The brace includes all samples dated according to the age-depth model to 600 cal yr BP 77

Tableau 1 : Âges radiocarbone obtenus sur la carotte Tfer06 et calibrés selon Oxcal 4.2.2. et la courbe ShCal13. Les astérisques indiquent les échantillons qui ne sont pas pris en compte dans le modèle d'âge-profondeur/Radiocarbon dates obtained on core Tfer06 and calibrated using Oxcal 4.2.2. and the ShCal13 curve. The asterisks indicate samples excluded from the age-depth model 57

Tableau 2 : Âges radiocarbone obtenus sur la carotte Ota2 et calibrés selon Oxcal 4.2.2. et la courbe ShCal13. Les astérisques indiquent les échantillons qui ne sont pas pris en compte dans le modèle d'âge-profondeur/Radiocarbon dates obtained on core Ota2 and calibrated using Oxcal 4.2.2. and the ShCal13 curve. The asterisks indicate samples excluded from the age-depth model 74

## Quatrième partie : Interprétations et discussions

- Figure 1 : Biplot des données polliniques. Les couleurs repèrent les associations végétales définies dans le diagramme pollinique d'Emaotfer/*Biplot of the pollen data. The colors spot the plant associations defined in the pollen diagram from the Emaotfer Swamp* 83
- Figure 2 : Répartition statistique des spectres polliniques/*Statistical distribution of the pollen spectra* 86
- Figure 3 : Biplot des données polliniques. Les couleurs repèrent les associations végétales définies dans le diagramme pollinique d'Otas/*Biplot of the pollen data. The colors spot the plant associations defined in the pollen diagram from the Otas Lake* 89
- Figure 4 : Répartition statistiques des spectres polliniques/*Statistical distribution of the pollen spectra* 92
- Figure 5 : Extrait du diagramme pollinique d'Emaotfer présenté dans le chapitre Résultats (point 1.4). Les taxons introduits ont été exclus de la somme de base/*Extract from the Emaotfer pollen diagram exposed in the Results section (point 1.4). The introduced taxa were excluded from the base sum* 93
- Figure 6 : Présence des diatomées et des ostracodes dans la carotte Tfer06/*Diatoms and ostracods occurrence in core Tfer06* 97
- Figure 7 : Quantifications climatiques de la séquence pollinique du marais d'Emaotfer/*Climatic quantifications of the pollen sequence from the Emaotfer Swamp* 101
- Figure 8 : Extrait du diagramme présenté dans le point 2.3. du chapitre Résultats. Les taxons côtiers (mangrove et littoral) ont été regroupés en un seul spectre pollinique/*Extract from the Emaotfer pollen diagram exposed in the Results section (point 2.3). The coastal taxa (mangrove and seashore) have been group under a single pollen spectrum* 105
- Figure 9 : Carte du site de Teouma, représentant les zones fouillées et la culture correspondante/*Map of the Teouma site, representing excavated areas and the corresponding culture* 108
- Figure 10 : Courbes de la concentration en charbons et des taxons introduits de la carotte Tfer06. Le rectangle signale la période de surabondance de *Piper* et *Macropiper*, l'étoile la zone contenant des grains de *P. methysticum*/*Curves of the charcoal concentration and introduced taxa of core Tfer06. The rectangle indicates the period of*



*overabundance of Piper and Macropiper, the star the area containing P. methysticum pollen grains* 112

Figure 11 : Mise en parallèle des différentes zones polliniques et des enregistrements de micro-charbons du marais d'Emaotfer et du lac Otas avec les données climatiques (ENSO) et archéologiques (dates d'occupations et régime alimentaire)/*Parallel display of the different pollen zones and the micro-charbons records from the Emaotfer Swamp and the Otas Lake with climatic data (ENSO) and archaeological records (settlement dates and diet)* 125

Figure 12 : Résumé des résultats issus des études polliniques et de micro-charbons pour les carottes Tfer06 et Ota2/*Summary of the results obtained from palynological and microcharcoal studies for Tfer06 and Ota2 cores* 133

## LISTE DES ANNEXES

### ANNEXES LIST

Annexe 1 : Photos des sites étudiés/*Photos of the studied sites*

Annexe 2A : Sépultures du Vanuatu/*Burials of Vanuatu*

Annexe 2B : Artefacts préhistoriques du Vanuatu/*Prehistoric artefacts of Vanuatu*

Annexe 3A : Modèle âge-profondeur (statistiques bayésiennes) de la carotte Tfer06/*Age-depth model (Bayesian statistics) of core Tfer06*

Annexe 3B : Modèle âge-profondeur (statistiques bayésiennes) de la carotte Ota2/*Age-depth model (Bayesian statistics) of core Ota2*

Annexe 4 : Observation et identification de la végétation autour du marais d'Emaotfer/*Observation and identification around the Emaotfer Swamp*

Annexe 5 : Coupe d'un grain de pollen fossile/*Sectional view of a fossil pollen grain*

Annexe 6 : Pollinisation, production et dispersion des grains de pollen des taxons les plus fréquemment rencontrés/*Pollination, pollen grain production and dispersal of the most frequently encountered taxa*

Annexe 7 : les logiciels employés lors de cette thèse/*The softwares used during this thesis*

Annexe 8A : ACP Tfer06/*Tfer06 PCA*

Annexe 8B : ACP Ota2/*Ota2 PCA*

Annexe 9 : Espaces climatiques des taxons les plus fréquemment rencontrés dans les échantillons du marais d'Emaotfer/*Climatic spaces of the most frequently encountered taxa in the Emaotfer Swamp samples*

Annexe 10 : Cartes Topologiques Auto-Organisatrices pour la carotte Tfer06/*Self organizing maps for core Tfer06*

Annexe 11 : Phytolithes et grains d'amidons frais/*Phytoliths and starch grains from reference collections*

Annexe 12 : Photos des mousses 1, 2, sous-bois et de la végétation environnante des mousses/*Photos of the mosses 1, 2, collected in an understorey vegetation and the surrounding vegetation of the mosses*

Annexe 13A : Diagramme détaillé de la carotte Tfer06/*Detailed diagram of core Tfer06*

Annexe 13B : Diagramme détaillé de la carotte Ota2/*Detailed diagram of core Ota2*

Annexe 14 : Détermination des foraminifères et des algues des niveaux sableux du lac Otas/*Foraminifera and algae identification from Lake Otas sand beach levels*

Annexe 15 : Quantifications climatiques de la séquence pollinique du marais d'Emaotfer.  
Les taxons de la forêt secondaire sont inclus dans le calcul/*Climatic quantifications of the  
pollen sequence from the Emaotfer Swamp. Disturbed forest taxa are included in the  
calculation*

Planche : Photos pollen fossile - Plantes introduites retrouvées à Efate/*Photos of fossil  
pollen - introduced plants found in Efate Island*

Compte-rendu du congrès APLE-APLF 2013/*APLE-APLF 2013 congress report*

Compte-rendu du congrès INQUA 2015/*2015 INQUA congress report*





## Introduction

Depuis les années 1970, de nombreuses fouilles archéologiques sont organisées dans l'archipel du Vanuatu. Les découvertes ont révélé un patrimoine remarquable et une diversité de cultures variant selon le temps et la géographie.

Vers 3500 ans BP, un peuple de navigateurs, probablement originaire de Papouasie Nouvelle-Guinée, commence une importante opération d'exploration d'îles vierges du Pacifique sud-ouest et central. Ces migrations, qui se produisent environ 46 000 ans après les précédentes vagues de déplacements du sud-est asiatique vers l'Australie et les îles Salomon, auraient été causées par des changements climatiques, une augmentation démographique et des éruptions volcaniques (Anderson et al., 2006 ; Bellwood, 2011 ; Fitzpatrick et Callaghan, 2013 ; Specht, 2007). Toutes les populations parties à cette période partageaient une tradition commune, appelée le complexe culturel Lapita. Il est identifié dans les niveaux archéologiques par des céramiques très finement décorées (Gifford et Shulter, 1956 ; Green, 1979).

Au Vanuatu, la culture Lapita est datée entre 3200 et 2900 ans BP et est suivie par un ensemble de traditions post-Lapita qui se terminera autour de 1000 ans BP (Garanger, 1972 ; Kirch, 2000). En revanche, très peu de données existent entre 1200 et 600 ans BP ; ceci est dû à la difficulté d'identifier des sites archéologiques sans poteries. Les données ethnographiques et les nombreux niveaux contenant des artefacts en os et en coquillages nous permettent de reconstituer l'histoire des périodes les plus récentes (Garanger, 1972 ; Shutler et al., 2002).

L'Holocène est la dernière période géologique du Quaternaire, datant de 0,0117 Ma jusqu'à aujourd'hui, d'après la International Chronostratigraphic Chart de 2014. Elle correspond à l'interglaciaire actuel suivant la dernière glaciation du Pléistocène. Au cours de l'Holocène, le climat est influencé par trois forçages naturels principaux : orbital (excentricité, précession, obliquité), solaire et volcanique. Les différentes combinaisons de ces forçages seraient à l'origine des variations climatiques enregistrées au cours des 6 000 dernières années (Cole-Dai et al., 2013 ; Firth et al., 2014 ; Mohtadi et al., 2007 ; Wanner et Bütikofer, 2008 for a review). Dans le Pacifique tropical, ces forçages se traduisent par les déplacements des Zones de Convergences InterTropicale et Sud Pacifique (respectivement ITCZ et SPCZ), ainsi que par des variations de fréquences et d'amplitude des événements El Niño/La Niña. Dans le Pacifique sud-ouest,

les saisons sèches sont favorisées en période El Niño, alors que les saisons humides sont prolongées en période La Niña (eg. Hu et al., 2008 ; Partin et al., 2007 ; Renseen et al., 2005).

L'archipel du Vanuatu est localisé au niveau de la zone de subduction caractérisée par l'enfoncement de la plaque tectonique Australie sous la plaque Pacifique. L'archipel est d'origine volcanique, et les premières îles ont émergé vers la fin de l'Oligocène à partir d'une large plateforme comprise entre 100 et 3000 m de profondeur.

Selon leur âge de formation et leur position par rapport à la zone de subduction, la taille et la hauteur des îles varient. Une douzaine de volcans aériens et sous-marins sont encore actifs sur l'archipel (données du Smithsonian Institution).

Lors de la période holocène, les conditions environnementales (biodiversité et phénomènes physiques) sont influencées par l'impact anthropique, les conditions climatiques, le volcanisme et les mouvements tectoniques (Goudie, 2013 ; Wanner et al., 2008). L'archipel du Vanuatu est une zone idéale pour étudier les relations entre ces différents phénomènes.

Les populations qui ont atteint les îles vierges du Pacifique sud-ouest vers 3000 ans BP ont probablement été affectées par les changements climatiques, au moment des migrations et une fois installées sur un site (Anderson et al., 2013 ; Brázdil et al., 2005 ; Field et Lape, 2010). Mais les Hommes ont eux-mêmes modifié les territoires qu'ils ont colonisés (eg. Anderson, 2008 ; Fall, 2005 ; Horrocks et al., 2009 ; Prebble et Wilmshurst, 2009 ; Stevenson, 2004 ; Summerhayes et al., 2009 ; Worthy et al., 2015). Le Vanuatu et la Nouvelle-Calédonie sont vraisemblablement les premiers archipels atteints par les navigateurs Lapita (Kirch, 2000) et constituent donc une zone d'étude clé pour la compréhension des migrations de cette période. En raison de la position géographique, plus au nord par rapport à la Nouvelle-Calédonie, la région du Vanuatu est plus fortement soumise à l'influence de la SPCZ, à ses variations d'intensité et à ses déplacements, enregistrant ainsi plus sensiblement la variabilité climatique au cours du temps. La zone de subduction Australie-Pacifique est très active, les surrections tectoniques, pouvant modifier la ligne de rivage, et les éruptions volcaniques sont fréquentes. Ces évènements influencent la faune, la flore et les comportements des populations (indirectement ou directement) du Vanuatu.

La palynologie est un outil efficace pour comprendre la réponse de la végétation face aux pressions anthropiques, aux changements climatiques, ainsi qu'aux épisodes tectoniques et volcaniques. Au Vanuatu, la plupart des analyses concernent la géologie sous-marine (Lecolle et al., 1990 ; Pineda et Galipaud, 1998 ; Woodroffea et Horton, 2005), le volcanisme (Ash et al., 1978 ; Robin et al., 1993 ; Witter et Self, 2006), l'archéologie (Bedford et al., 2006 ; Galipaud et al., 2014 ; Valentin et al., 2010b, 2014) et les données paléoclimatiques issues des modèles, proxys marins (coraux, foraminifères) et spéléothèmes (Asami et al., 2013 ; Corrège et al., 2000 ; Donders et al., 2008 ; Partin et al., 2013). Malgré le nombre croissant d'études paléoécologiques dans la région du Pacifique sud-ouest (Dotte-Sarout, 2015 ; Fall, 2005 ; Hope et al., 1999, 2009, for a review ; Horrocks et al., 2009 ; Stevenson, 2004 ; Wirrmann et al., 2011b), les relations entre l'Homme et l'environnement restent complexes à appréhender. Les situations varient d'un archipel à un autre, presque d'une île à une autre.

Notre analyse palynologique, une des premières de ce genre réalisées sur l'archipel du Vanuatu, contribue à la reconstitution des paléoenvironnements et s'intègre dans l'ensemble des études citées plus haut. Le but de cette thèse est d'abord de décrire l'influence de activités humaines sur l'environnement depuis les premières migrations, de déterminer les variations climatiques qui ont pu causer ces déplacements et les modifications de la végétation au cours de l'Holocène supérieur. Nous cherchons aussi à caractériser les comportements humains, l'adaptation des populations à des îles vierges et les modifications qu'elles ont put y apporter.

Pour mener à bien ce travail, il a été nécessaire d'acquérir une bonne connaissance de la végétation d'Océanie et de comprendre sa dynamique en l'absence et en présence d'actions anthropiques.

Le Vanuatu, comme l'ensemble des îles récentes du Pacifique sud-ouest, a d'abord été une île vierge de toute espèce animale comme végétale. Le vent, les oiseaux, les courants marins ou les radeaux naturels ont transporté la faune et la flore, principalement originaires de l'Asie du sud est, jusqu'à l'archipel (Schmid, 1987). L'isolement de l'archipel a conduit à l'apparition de certaines espèces endémiques.

La relativement faible diversité floristique et faunistique des îles à l'est de la Nouvelle-Guinée empêche un peuplement permanent de cette région sans une base économique horticole (Kirch, 1997 for a review). Ainsi, beaucoup de plantes cultivées au



Vanuatu ont été introduites par l'Homme (Walter et al., 2003), leur détermination dans les analyses palécécologiques sont donc un moyen de définir l'impact anthropique sur l'environnement (Horrocks et Bedford, 2005 ; Horrocks et al., 2009). De plus, l'installation des premières populations est souvent marquée par une augmentation des feux et une ouverture du paysage (Spriggs, 2010 for a review). À l'heure actuelle, l'agriculture sur brûlis est encore beaucoup pratiquée au Vanuatu, les forêts ont beaucoup régressé, la végétation secondaire, héliophile et sans exigence écologique particulière, domine (Blanco et al., 2013 ; Wheatley, 1992). L'état du paysage moderne résulte d'un ensemble d'action de facteurs principalement climatiques et anthropiques au cours du temps.

Cette thèse se concentre sur deux carottes palustres prélevées sur deux sites de l'île d'Efate, au centre du Vanuatu. La plus grande carotte est issue d'un marais localisé sur la côte sud d'Efate, près d'un important site archéologique daté de la période Lapita. La carotte suivante provient d'un lac situé en bord de mer sur la côte est. Des données ethnographiques (Guiart, 1973) indiquent l'arrivée d'un chef polynésien à cet endroit au 15<sup>ème</sup> siècle.

Pour aborder l'étude paléoenvironnementale de ces sites, nous avons principalement utilisé l'analyse à haute résolution (pour la palynologie) des grains de pollen et des micro-charbons. Celle-ci a été complétée par la détermination de plusieurs phytolithes et grains d'amidon afin de déceler la présence de morphotypes typiques de certains taxons cultivés, ainsi que par les résultats issus de calculs statistiques (ACP, quantification climatique). Nous avons pris également en compte les données sédimentologiques et de micro-faune obtenues antérieurement.

Notre étude se structure en 4 grandes parties. D'abord le contexte géologique, climatique et la flore du Vanuatu sont exposés, ainsi que la synthèse des connaissances des relations Homme-climat-végétation. Les méthodes utilisées sont ensuite décrites, puis les résultats paléoenvironnementaux obtenus pour les sites étudiés sont présentés. Enfin l'interprétation de ces résultats et une discussion par rapport aux données de la littérature clos ce travail.





## 1. Contexte régional de l'archipel du Vanuatu

### 1.1. Géologie et Géomorphologie

L'archipel du Vanuatu est situé dans le Pacifique sud-ouest, entre 13°04' et 20°16 S et 166°32' et 170°14' E, au niveau de la zone de subduction entre les plaques Australie et Pacifique. L'archipel émerge d'une large plateforme située entre 100 et 3000 m de profondeur. Les îles sont d'origines volcaniques, les plus anciennes datant de la fin de l'Oligocène. Selon leur âge de formation et leur position par rapport à la zone de subduction, la taille et la hauteur des îles varient. Une douzaine de volcans aériens et sous-marins sont encore actifs sur l'archipel (données du Smithsonian Institution).

Lors d'une mission réalisée au Vanuatu en 2005, une série de carottage a été effectuée sur un transect nord-sud de l'archipel. Trois îles ont été retenues : Santo, la plus grande île, où un important recensement de la biodiversité y a été mené par le MNHN, l'IRD et Pro-Natura International en 2006 ; Efate, où de nombreuses dépressions remplies d'eau sont présentes ; Tanna, une île volcanique active encore aujourd'hui.

Pour cette thèse, deux carottes prélevées sur deux sites différents à Efate ont été choisies (figure 1A) : les enregistrements couvrent une période de temps supérieure à 1000 ans BP et le sédiment de surface ne montre pas de trace de remaniement (piétinement par le bétail par exemple). Cette île, où se trouve la capitale Port Vila, est localisée entre 17°25' et 17°50' S et 168°10 et 168°35' E. Une chaîne montagneuse dominée par le mont McDonald, à 647 m d'altitude, se situe au centre de l'île (figure 1A).

L'enregistrement le plus long, la carotte Tfer06, a été obtenu dans le marais d'Emaotfer, situé à moins de 4 km de la mer, au sud de l'île (figure 1B). D'une longueur est-ouest de 1,4 km et d'une profondeur d'eau maximale de 1 m, ce marais est vraisemblablement une dépression formée dans une doline au début de l'Holocène. Les reliefs alentours n'excèdent pas 100 m d'altitude (Sémah et Wirrmann, 2006).

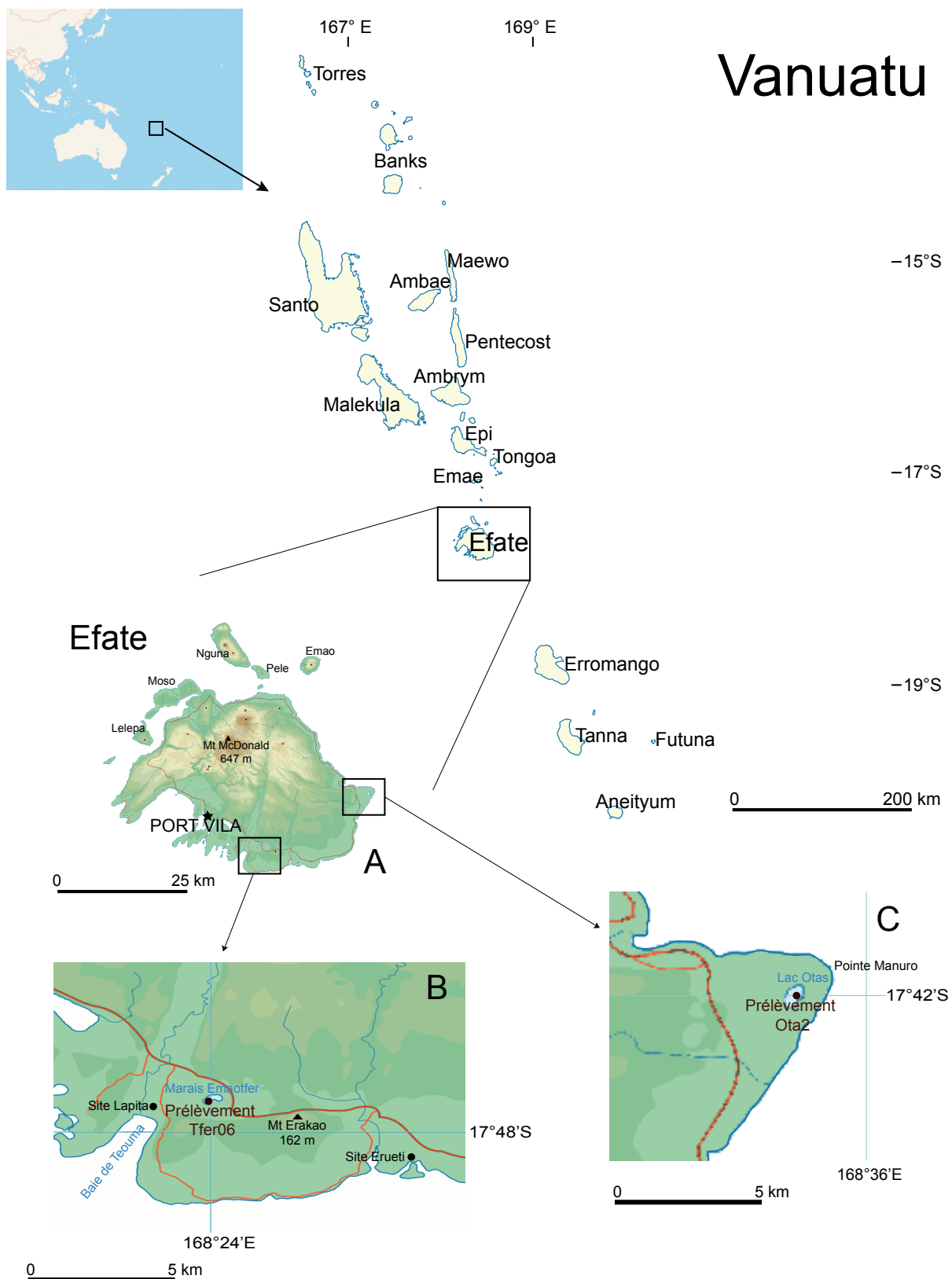


Figure 1 : Localisation de l'archipel du Vanuatu et des sites où ont été prélevées les carottes Tfer06 et Ota2. D'après la carte topographique Hema Maps, 3<sup>ème</sup> édition, 1999

Le marais est alimenté en eau par les pluies et par le ruissellement le long de pentes menant à la dépression. La carotte Tfer06 a été prélevée sous une faible tranche d'eau (environ 20 cm). Il est essentiel de noter la présence d'un important site archéologique à l'ouest du marais, datant des premières migrations ayant atteint le Vanuatu, autour de 3000 ans cal BP (voir 2.1.).

Le deuxième enregistrement étudié, la carotte Ota2, est issu du lac Otas, à 500 m du bord de mer sur la pointe est de l'île d'Efate (figure 1C). Le grand axe de ce lac, orienté nord-sud, s'étend sur 730 m de long. Le niveau d'eau peut varier de  $\pm 60$  cm et la profondeur maximale enregistrée est de 6 m (Sémah et Wirrmann, 2006). La proximité avec le rivage marin et la présence de nombreux niveaux de sables et de coquilles dans les carottes prélevées, nous indiquent que ce lac a probablement constitué à plusieurs reprises un bras de mer au cours de l'Holocène récent. Les pluies alimentent majoritairement le lac, le faible dénivelé (entre 0 et 2 m d'altitude) dans cette zone limite le ruissellement. La carotte Ota2 a été prélevée sous environ 4 m d'eau. Les premières traces d'occupations humaines remontraient vers le 15<sup>ème</sup> siècle d'après les études ethnographiques (voir point 2.3.).

L'île d'Efate, d'une superficie de 985 km<sup>2</sup>, s'est formée à la suite d'une explosion sous marine au Pléistocène inférieur, qui a constitué un socle volcanique (tufs et basaltes), aujourd'hui aplani par l'érosion. Il n'y a plus de volcan actif sur Efate à l'heure actuelle. Des mouvements tectoniques (0,2-0,6 mm/an au nord-ouest et 0,8-1 mm/an au sud) depuis le Pléistocène moyen ont surélevé des formations coralliennes récifales, à l'origine des plateformes calcaires (Ash et al., 1978 ; Quantin, 1972-1977 ; Lecolle et al., 1990). De nombreuses failles orthogonales et de grands bassins d'effondrements entaillent ces formations géologiques. Au cours de la dernière remontée du niveau de la mer (vers 10 000 ans) les plaines d'effondrements tectoniques comme celle de la Teouma se sont comblées d'alluvions fluviales (figure 2).

## 1.2. Le climat

Le climat équatorial du Vanuatu est chaud, humide et influencé par les alizés du sud-est. Ces vents maritimes poussent les eaux de surface de l'océan d'est en ouest, et l'accumulation d'eaux chaudes à l'ouest du Pacifique forme la Warm Pacific Warm Pool

ou WPWP (Wyrтки, 1989). Ces eaux chaudes plongent à l'ouest du Pacifique, entraînant un courant sous-marin, et un upwelling côtier au niveau de l'Amérique du sud. Les alizés du sud-est rejoignent ceux du nord-ouest au niveau de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). Les déplacements de la ZCIT et de la ZCSP (Zone de Convergence Sud Pacifique), associés à la West Pacific Warm Pool (WPWP), contribuent à la cyclicité du climat, définie par deux saisons, pas toujours bien différenciées : une saison humide, caractérisée par une période de fortes pluies et de cyclones (été austral de novembre à avril) et une saison plus sèche, le reste de l'année (Beucher, 2010, for a review).

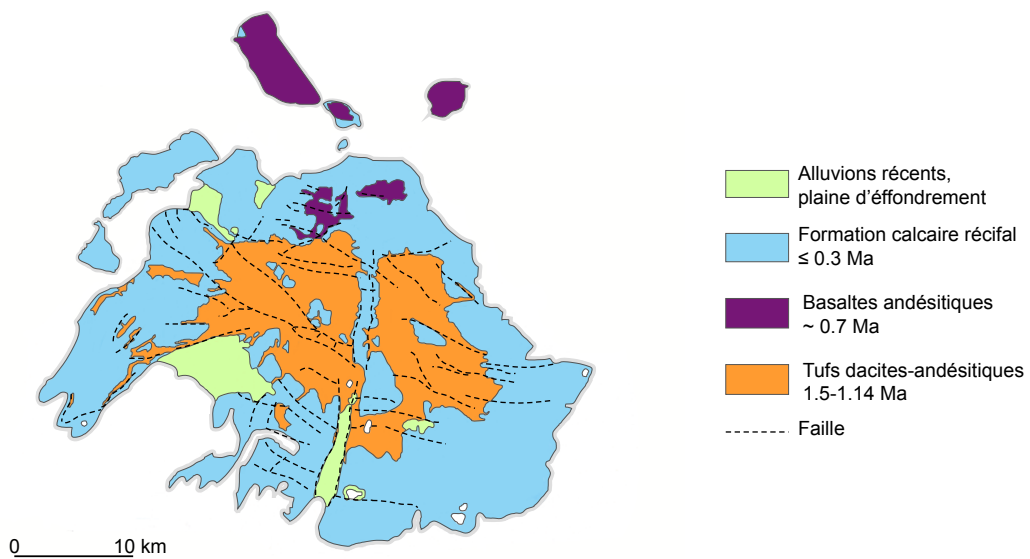


Figure 2 : Carte géologique simplifiée d'Efate et des îles alentours. D'après Quantin, 1972-1977

Tous les 2 à 7 ans, des évènements El Niño/La Niña (ENSO) modifient le climat en favorisant des saisons sèches anormalement longues ou particulièrement humides. Durant une période El Niño, l'accumulation d'eau chaude ne se fait plus dans le Pacifique ouest et la WPWP se déplace vers le centre équatorial, entraînant avec elle les précipitations qui lui sont associées ; cela se traduit par une diminution de la température de l'eau et une sécheresse du climat dans les îles du Pacifique sud-ouest (Wyrтки, 1989). Les évènements La Niña sont associés à des impacts de structure similaire mais de déroulement et conséquence opposés.

Au sein même de chaque île, le climat varie : le versant “au vent” est exposé au souffle des alizés qui apportent des pluies importantes et régulières ; le versant “sous le vent,” qui est protégé par les reliefs des alizés, connaît une pluviosité moindre et des saisons plus marquées ; les sommets (à partir de 300 - 500 m) sont caractérisés par une baisse des températures et une augmentation de la pluviométrie par rapport au niveau de la mer. Les fortes précipitations rendent parfois l'évaporation impossible et sont à l'origine d'une couronne nuageuse quasi permanente (Siméoni, 2009 for a review).

Le climat d'Efate se caractérise par des températures moyennes extrêmes allant de 15 à 33 °C et des précipitations moyennes annuelles de 2143 mm (données du Vanuatu Meteorological Services). Malgré le faible relief, une différence thermique et pluviométrique est observée entre l'est et l'ouest, ainsi qu'entre le niveau de la mer et les sommets (figure 3).

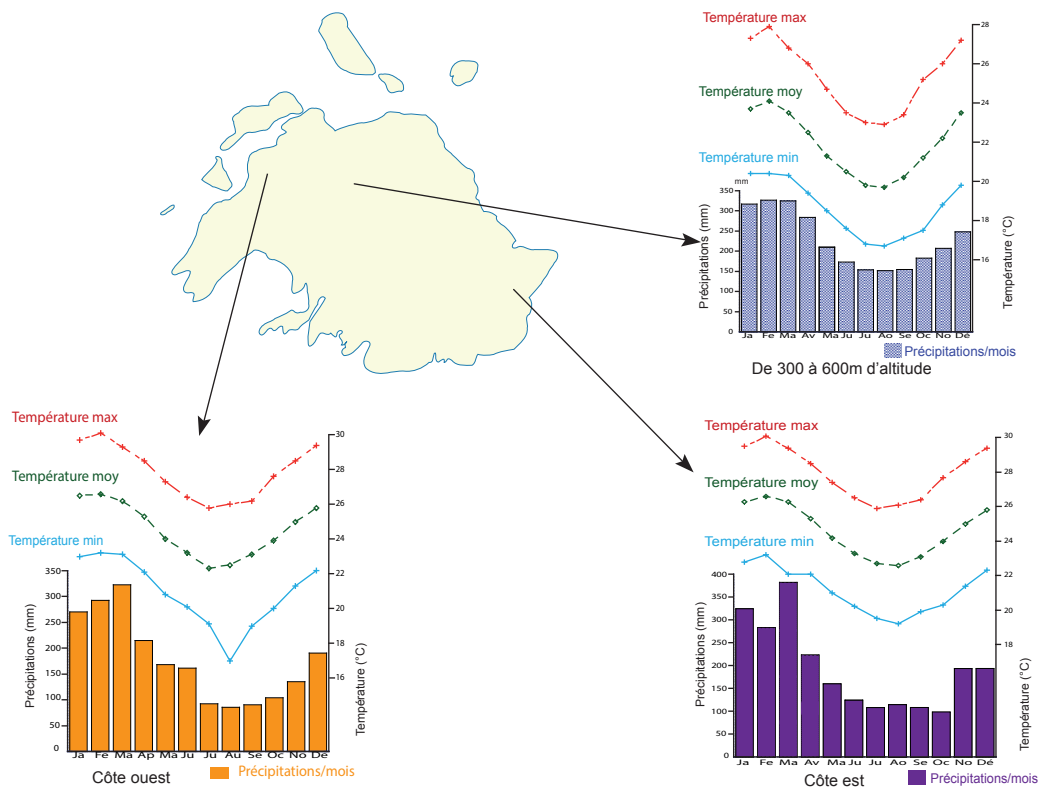


Figure 3 : Diagrammes ombrothermiques des différentes régions d'Efate. D'après Siméoni, 2009, for a review et [www.meteo.gov.vu](http://www.meteo.gov.vu)



La combinaison des différents forçages naturels (orbital, solaire et volcanique) et des déplacements de la ZCIT et de la ZCSP seraient à l'origine des variations climatiques holocènes, comme les événements ENSO qui ont présenté des amplitudes et des fréquences variables depuis 5 000 ans BP environ (eg. Conroy et al., 2008 ; Fleitmann et al., 2003 ; Gagan et al., 2004 ; Hu et al., 2008 ; Moy et al., 2002 ; Wanner et Bütikofer, 2008 for a review). De fortes fluctuations de l'activité solaire et/ou de fortes éruptions volcaniques pourraient être les causes principales de l'Optimum Médiéval et du Petit Âge Glaciaire (Mohtadi et al., 2007 ; Cole-Dai et al., 2013 ; Firth et al., 2014).

### 1.3. La végétation

Deux grands ensembles de végétations peuvent être distingués sur l'archipel du Vanuatu : à l'est, une forêt tropicale humide, et à l'ouest une forêt semi-décidue. La répartition de ces deux ensembles dépend du régime des pluies (voir point 3.1.). L'altitude, l'augmentation de la précipitation et la baisse des températures vont modifier la composition de la forêt tropicale humide, en favorisant le développement des épiphytes et des fougères arborescentes. Des petits arbres avec une faible canopée et l'écorce couverte de mousses sont caractéristiques de cette végétation.

L'urbanisation grandissante de l'archipel est à l'origine de l'augmentation de l'abondance des plantes introduites (n'existant pas à l'état naturel au Vanuatu), des cocoteraies et des pâturages. Due à la présence de la capitale, il ne subsiste en réalité que peu de forêt non dégradée à Efate, sauf vers le centre de l'île (figure 4).

La rive nord du marais d'Emaotfer est fortement anthropisée par la présence d'habitats, de jardins et de zones de pêche. La rive sud, sur une propriété privée, est un peu plus protégée. Elle est composée d'herbes aquatiques (Cyperaceae, Nymphaeaceae) et de fougères dans la zone inondée, des fourrés à *Hibiscus tiliaceus* (Malvaceae) et à *Castanospermum australe* (Fabaceae) colonisent la zone de battement des eaux. Une forêt principalement composée de *Pandanus sp.* (Pandanaeae) succède aux fourrés. La présence d'élevage sur le plateau entourant le marais est à l'origine d'une savane anthropisée à Urticaceae, Moraceae, Burseraceae et Flacourtiaceae (Annexe 1).

La végétation entourant le lac Otas présente aussi des signes de dégradation. Une frange de Cyperaceae constitue le rivage du lac, à laquelle succède une ceinture arborée principalement composée de *Barringtonia sp.* (Lecythidaceae), d'*Hibiscus tiliaceus*

(Malvaceae), de Myrtaceae et de Fabaceae. En s'éloignant de la rive, une savane fortement anthropisée remplace cette ceinture. L'ouverture de la végétation est plus marquée sur la rive est (Annexe 1).

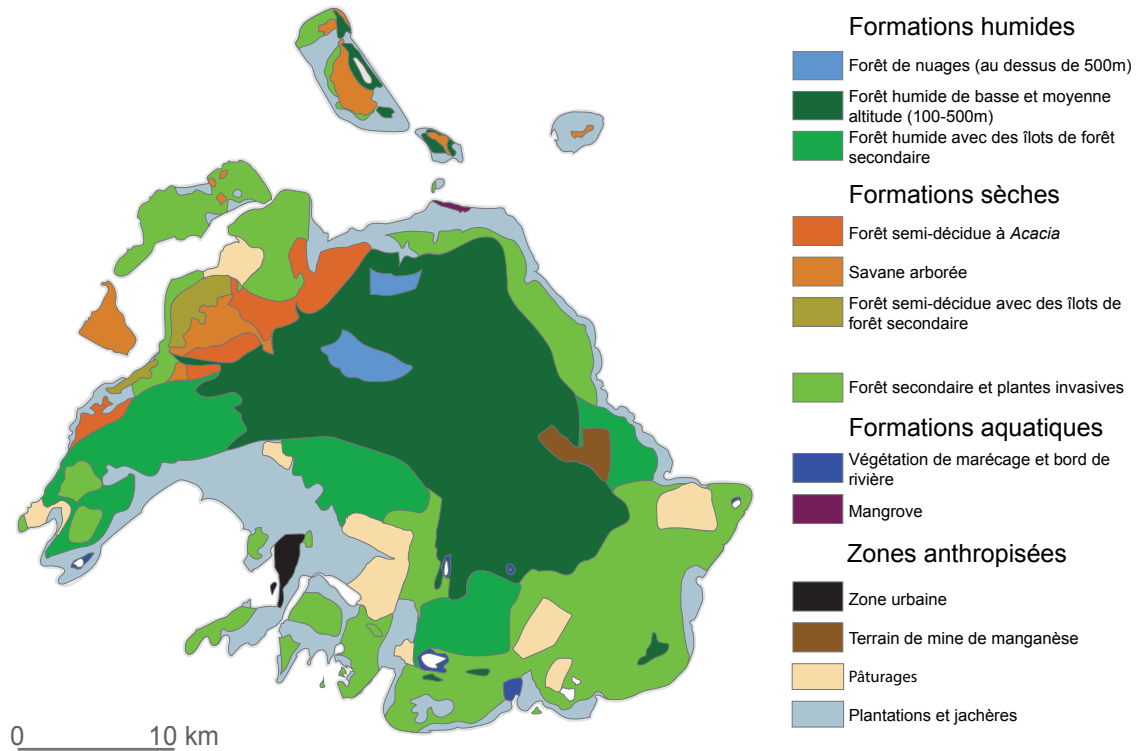


Figure 4 : Distribution de la végétation sur Efate et les îles alentours. D'après Quantin, 1972-1977 et Siméoni, 2009 for a review

## 2. Occupations préhistoriques du Vanuatu et d'Efate

### 2.1. Les premières migrations

La datation de sites archéologiques et les analyses d'ADN sur des restes humains issus des îles du Pacifique sud-ouest ont permis de déterminer deux vagues de migrations qui ont atteint l'Océanie à partir de l'Asie du sud est (figure 5). La première vague s'est produite entre 53 et 40,000 ans BP et a conduit les populations vers la Papouasie-Nouvelle-Guinée, quelques îles de l'Océanie Proche (îles Bismarck et nord-ouest des îles Salomon) et l'Australie (eg. Bowler et al., 2003 ; Pope et Terrell, 2007 for a review ; Rasmussen et al., 2011 ; Turney et al., 2001 ; Wickler et Spriggs, 1988). La

deuxième vague est beaucoup plus récente, amenant des populations des îles Bismarck vers l'Océanie Lointaine (à l'est des îles Salomon jusqu'aux Tonga/Samoa) à partir de 3500 ans (eg. Bedford et Spriggs, 2007 ; Burley et Connaughton, 2007 ; Kirch, 2000 ; Sand, 2010 for a review ; Summerhayes et al., 2010). Des tessons de poteries à décors pointillés, datant de 3000 ans cal BP, ont été découverts pour la première fois au lieu-dit Lapita, en Nouvelle-Calédonie (Gifford et Shulter, 1956). La description de ces tessons a permis de définir la culture associée à la deuxième vague de déplacement de populations sous le nom de "complexe culturel Lapita" (Green, 1979). Cette culture, datée de 3500 à 2800 ans BP, se serait étendue rapidement des îles Bismarck aux Fiji grâce aux migrations humaines.

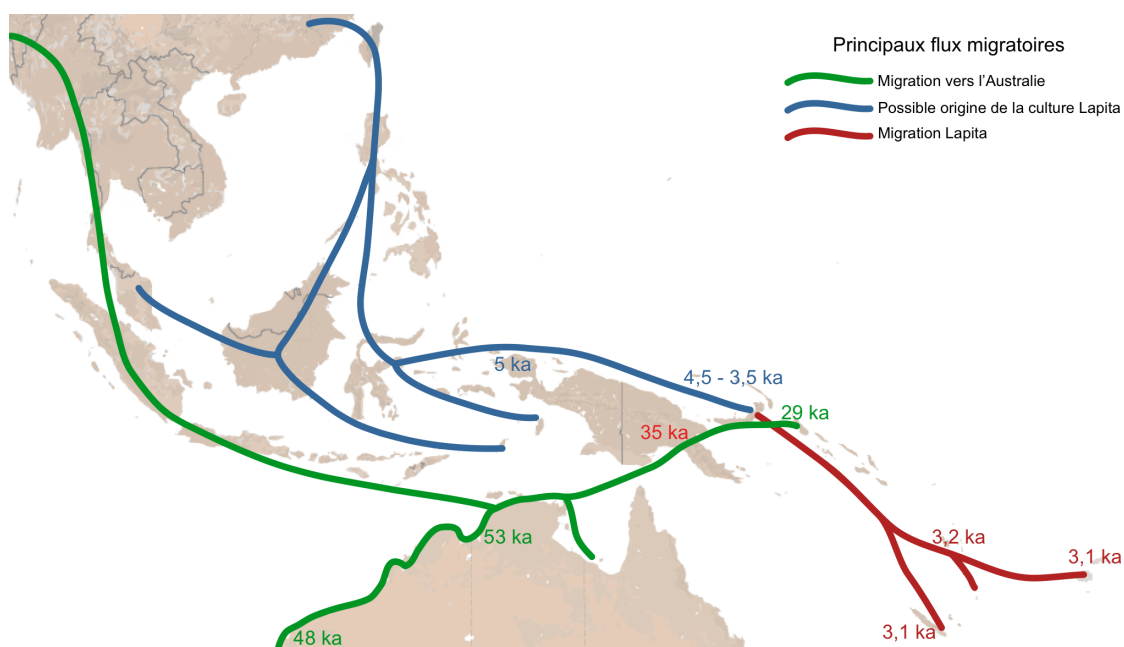


Figure 5 : Principales routes de migrations dans le Pacifique sud-ouest depuis le Pléistocène. Les dates correspondent aux sites archéologiques les plus anciens de chaque région. D'après Bellwood, 2005, 2011 ; Donohue et Denham, 2012 for a review ; Pawley, 2007 ; Pope et Terrell, 2007, for a review ; Wickler et Spriggs, 1988

Les hypothèses justifiant une deuxième vague de peuplement si tardive par rapport à la première restent un sujet de débat : une augmentation démographique, des conditions climatiques particulières et/ou des éruptions volcaniques violentes ont pu inciter les populations à se déplacer vers l'est du Pacifique (Anderson, 2006 ; Bellwood, 2011 ; Fitzpatrick et Callaghan, 2013 ; Irwin, 2008 for a review). Des études génétiques

réalisées sur des ossements d'animaux introduits par l'Homme (par exemple le chien, le cochon et le poulet – voir point 3.4.), et en particulier le rat permettent d'obtenir des informations sur l'origine et le trajet des migrations humaines (Larson et al., 2007 ; Matisoo-Smith et Robins, 2009 ; Storey et al., 2010 ; Thomson et al., 2014). Ainsi, ces analyses ont révélées deux introductions du rat en Océanie Lointaine : la première lors de la migration Lapita et la seconde vers 1000 ans BP, d'origine Micronésienne (Matisoo-Smith, 2007).

L'origine de la culture Lapita est incertaine : elle aurait émergé, selon certains auteurs, grâce à des innovations au sein de populations de la Mélanésie insulaire (Allen et White, 1989 ; Gosden, 1989 ; Terrel 2004 ; White et Allen, 1980). D'autres voient l'intrusion d'une nouvelle population venant d'Asie du sud-est comme le phénomène à l'origine de cette culture (Bellwood et al., 1995 for a review ; Kirch et Hunt, 1988 for a review). L'hypothèse privilégiée actuellement par les chercheurs est en fait une combinaison des deux précédentes. Des populations venant du sud-est de la Chine et de Taïwan auraient atteint la Papouasie-Nouvelle-Guinée entre 5000 et 4500 ans BP et leurs technologies auraient évolué sur place en culture Lapita (figure 5). De nombreux échanges culturels et des migrations humaines se seraient produit pendant cette période entre les îles de l'Asie du sud-est, la Papouasie-Nouvelle-Guinée et les îles d'Océanie proche (eg. Bellwood, 2005 ; Donohue et Denham, 2012, for a review ; Pawley, 2007 ; Sand, 2010, for a review ; Soares et al., 2011 ; Wollstein et al., 2010).

Les céramiques, symboles de la culture Lapita, sont modelées à partir d'une pâte rouge brique, puis ornées de motifs pointillés ou incisés représentant des faces anthropomorphes et des figures géométriques (Garanger, 1972 ; Kirch, 1997, for a review ; Sand et al., 1996 ; Spriggs, 1990 – Annexe 2). Des traces de peintures sont parfois identifiées sur des poteries (Bedford, 2006a). Leur rareté est probablement due aux processus taphonomiques, considérables dans les zones tropicales (Green, 1979). La fragilité des poteries indique qu'elles devaient avoir une fonction particulière (rites funéraires, offrandes ?) à l'inverse de poteries plus simples et moins fragiles, utilisées probablement quotidiennement (Bedford et al., 2007 ; Chui, 2005, 2007). Des herminettes en pierres ou en coquillages, des éclats d'obsidiennes, des hameçons en os

et des parures en coquillages ou en os sont aussi fréquemment retrouvés sur les sites archéologiques Lapita (Kirch, 1997 for a review).

Au Vanuatu, le plus ancien site a été découvert à Makué, près de l'île de Santo (Galipaud et Kelly, 2007). Plusieurs niveaux d'occupations successifs indiquent une arrivée des premières populations entre 3240 et 3160 ans BP environ. Le cimetière de Teouma, localisé sur la rive gauche de la rivière du même nom (au sud d'Efate – figure 6 et Annexe 2A), constitue l'un des sites archéologiques les plus importants du Vanuatu, tant par le nombre d'artefacts et d'ossements retrouvés (plus d'une centaine d'individus à ce jour) que par l'âge du site, datant des premières migrations, autour de 3000 ans cal BP (Bedford et al., 2010 ; Petchey et al., 2014). Les études réalisées sur ce site donnent de précieuses indications sur les rituels funéraires complexes, qui semblent assez distincts de ceux relevés en Asie du sud-est, et sur les comportements de subsistance de ces populations (eg. Constantine et al., 2015 ; Kinaston et al., 2014b ; Scott et al., 2010 ; Valentin et al., 2010a, 2014, 2015 – voir le point 3.4.). Un régime alimentaire et des positions funéraires différents ont ainsi pu être observés pour quelques individus. Ils pourraient correspondre aux premiers migrants Lapita arrivés sur l'île d'Efate.

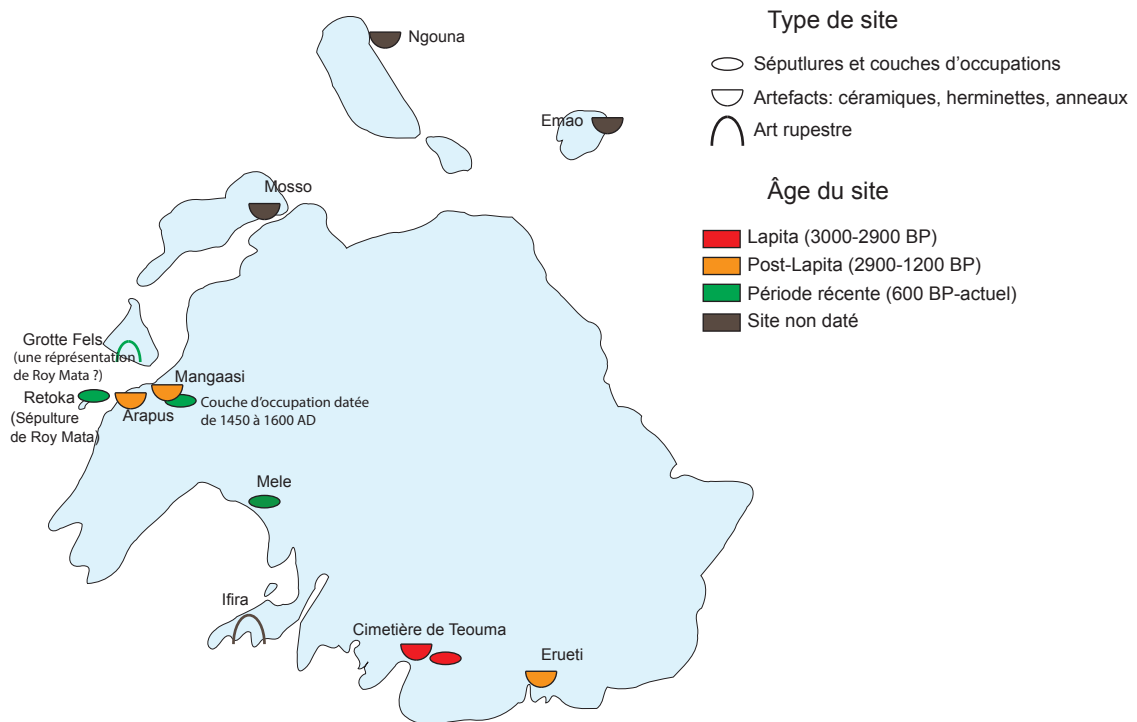


Figure 6 : Les sites archéologiques d'Efate et des îles alentours. D'après Bedford, 2006b, et Siméoni, 2009 for a review

## 2.2. Installations permanentes

Le complexe culturel Lapita se modifie entre 2900 et 2700 ans BP, pour former un ensemble de cultures post-Lapita, dont les caractéristiques varient selon le temps et la géographie. Cependant, les réseaux d'échanges entre les archipels de l'Océanie Lointaine se seraient maintenus pendant la période post-Lapita, à l'origine de quelques poteries aux formes et motifs similaires provenant de plusieurs îles (Bedford, 2006b, 2009 ; Garling, 2007 ; Spriggs 2004 ; Ward, 1979). Notre étude se concentre sur l'île d'Efate, ainsi nous allons présenter les caractéristiques majeures des cultures post-Lapita du centre du Vanuatu.

- La culture Arapus : elle est définie par le site éponyme Arapus, situé sur la côte nord-ouest de l'île d'Efate (figure 6) et daté entre 2900 et 2850-2800 ans BP. Le site Arapus constitue la plus ancienne trace d'installation humaine dans le nord-ouest d'Efate. Les tessons de poteries retrouvés sont uniquement décorés sur la lèvre (entailles) et les artefacts non céramiques (herminettes, anneaux, hameçons) sont de formes semblables à ceux découverts dans tous les sites post-Lapita (Bedford, 2006b ; Garanger, 1972 – Annexe 2B). Il est possible que cette culture fasse en réalité partie de la tradition Lapita, et les céramiques retrouvées seraient utilisées au quotidien, à l'inverse des poteries ornées de motifs pointillés et incisées, employées vraisemblablement lors de cérémonies et rituels (Bedford et Spriggs, 2000).
- La culture Erueti : cette culture succède à celle d'Arapus, et se termine autour de 2200 ans BP. Les artefacts distinctifs de la culture Erueti proviennent du site du même nom, sur la côte sud d'Efate (figure 6). Les herminettes, les anneaux et les éclats d'obsidiennes sont similaires à ceux retrouvés sur les sites Lapita. Les céramiques datées entre 2800 et 2500 ans BP (Erueti ancien) sont semblables à celles des sites d'Erromango et des îles Banks (Ward, 1979). Elles sont décorées de quelques motifs incisés. Après 2500 ans BP (Erueti récent), les poteries sont caractérisées par des formes plus diverses et des motifs linéaires ou géométriques plus fréquents, réalisés par incision (Bedford, 2006b, 2009 ; Garanger, 1972 – Annexe 2B).
- La culture Mangaasi : le site de Mangaasi, au nord-ouest d'Efate (figure 5) est le seul site du Vanuatu à documenter la période de 2000 à 1200 ans BP. Les décors incisés, en pointillés ou appliqués sont de plus en plus complexes et diversifiés. Après 1600

ans BP, certaines poteries présentent du surmodelage. Les artefacts non céramiques, principalement des anneaux en coquillage, sont peu variés (Bedford, 2009 ; Garanger, 1972 – Annexe 2B). Il s'agirait de la dernière culture de la préhistoire du Vanuatu associée à une phase importante de production de céramique.

La période allant de 1200 à 600 ans BP est très peu documentée, du fait de la difficulté à mettre au jour un site archéologique sans se baser sur la présence de tessons de poterie. De plus, les fouilles à l'intérieur des terres sont beaucoup moins fréquentes que celles sur les rivages, la présence d'une végétation dense rendant la tâche plus complexe (Bedford et Spriggs, 2014 for a review).

### 2.3. Influence de la culture polynésienne

À partir de 1400 AD, la culture polynésienne influence les sociétés des îles du centre et du sud de l'archipel. Peu de céramiques sont présentes dans les niveaux datant de 600 ans BP et au delà, alors que le nombre et la variété d'artefacts en os et coquillages est considérable (Shutler et al., 2002). Les dents de cochons recourbées en spirales, qui constituent un des symboles du Vanuatu, semble venir d'une tradition polynésienne (Garanger, 1972 ; Spriggs, 1997 for a review). Quand l'animal est encore jeune, les canines supérieures sont enlevées, permettant aux défenses inférieures d'atteindre une longueur bien plus importante qu'à l'état naturel. Les dents grandissent en spirale et forment un cercle complet au bout de 7 à 10 ans. Si la dent ne heurte pas la mâchoire inférieure (auquel cas elle s'y enfonce, risquant de provoquer la mort de l'animal), la dent continue de s'allonger, formant un deuxième, voire un troisième cercle (Bonnemaison, 1996, for a review). La croissance continue des dents chez les Suidés permet la formation de ces défenses en spirale.

Les fouilles archéologiques ont mis au jour trois sites en lien avec la vie et la mort de Roy Mata. Ce chef puissant, vraisemblablement d'origine polynésienne, aurait réorganisé les sociétés vanuataises d'Efate et des îles alentours et pacifié la région vers 1600 AD environ (Wilson et al., 2007 ; Coiffier, 2009 ; Garanger, 1972 ; Guiart, 1973). D'après les études ethnographiques, Roy Mata serait arrivé en pirogue à la pointe est d'Efate, près du lac Otas. Une couche d'occupation datée entre 1450 et 1600 AD, a été mise au jour

grâce aux fouilles organisées par J. Garanger en 1964 et 1966 à Mangaasi (figure 6), associée historiquement à la demeure de Roy Mata (Spriggs, 2006, for a review). Les fouilles de Garanger en 1967 sur l'île de Retoka (figure 6) ont permis d'exhumer une quarantaine de squelettes, des défenses de porcs et des bijoux en os et en coquillages datés autour de 1600 AD (Annexe 2A). En recoupant ces résultats avec les données ethnographiques, cette sépulture correspondrait à celle de Roy Mata, accompagné de ses femmes et des hommes désignés ou volontaires pour le suivre dans la tombe (Guiart, 1966 ; Valentin et al., 2011). Enfin, parmi les gravures et les peintures visibles sur la grotte Fels (figure 6 et Annexe 2A) datées de 2200 ans BP à 200 ans BP environ, une représentation anthropomorphe est identifiée comme étant celle de Roy Mata (Wilson et al., 2007 ; Wilson, 2002). Cette grotte correspondrait à l'endroit où le chef polynésien est décédé (Guiart, 1966).

### 3. Impacts des phénomènes naturels et anthropiques sur la végétation

#### 3.1. Les variations climatiques

Les variations des précipitations (en basse et haute altitude) et des températures (en haute altitude) sont les principaux facteurs influençant la distribution de la végétation au Vanuatu (Quantin, 1972-1977 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Siméoni, 2009, for a review) :

La forêt tropicale humide se développe à basse altitude, de la côte est jusqu'au centre d'Efate, avec 2500 à 4000 mm de pluie par an. Elle est principalement composée de grands arbres, notamment des Araliaceae (*Meryta*, *Schefflera*), des Podocarpaceae (*Podocarpus*), des Meliaceae (*Dysoxylum*), des Rubiaceae (*Nauclea*) et de Pandanaceae lianescentes (*Freycinetia*).

Sur la côte nord-est d'Efate, les précipitations sont comprises entre 2000 et 3000 mm par an. La forêt tropicale humide ne se développe plus de façon optimale et est remplacée par une forêt plus adaptée à des conditions plus sèches : la forêt semi-décidue. Elle est composée de quelques grands arbres, dont des Mimosoideae (*Acacia*), et d'autres Fabaceae (*Desmodium*, *Instia* ou *Pterocarpus*), des Burseraceae (*Garuga*), ainsi que de nombreuses espèces de buissons (*Micromelum*, *Psychotria* ou *Glochidion*) et d'herbes.



Avec l'altitude, les températures baissent (0,6°C tous les 100 m) et la pluviosité augmente (plus de 4000 mm de pluie par an), la végétation change, devient plus basse : elle est composée de petits arbres appartenant aux Myrtaceae (*Metrosideros*, *Syzygium*), Cunoniaceae (*Geissois*, *Weinmannia*) et Chloranthaceae (*Ascarina*), de nombreuses épiphytes et des fougères arborescentes.

Pendant l'été austral, de violents cyclones peuvent toucher les îles du Pacifique sud-ouest. Les vents forts et les pluies importantes vont détruire une partie de la végétation présente sur le passage du cyclone, notamment les grands arbres et la flore se développant sur les côtes (Holloway, 2013 ; Sauer, 1962). Ces tempêtes tropicales sont issues d'un courant d'air chaud venant de la mer, les fortes vagues associées à ces phénomènes vont particulièrement impacter la végétation du littoral et la mangrove, en déplaçant le substrat et en augmentant la salinité dans les estuaires.

Au cours du Quaternaire, la végétation est influencée par des variations climatiques importantes, notamment lors des transitions entre les périodes glaciaires/interglaciaires (Haberle, 2005 ; Kershaw et al., 2007 ; Stevenson et Hope 2005 ; Stevenson et al., 2001 ; Williams et al., 2009, for review), ou lorsque des événements El Niño/La Niña (ENSO) de fortes amplitudes se produisent fréquemment (e.g. Donders et al., 2008 ; Fletcher et al., 2015 ; Haberle et Ledru, 2001 ; Haberle et al., 2001 ; Hope et al., 2004 for a review ; Van der Kaars et al., 2010 ; Wirrmann et al., 2011a, 2011b – figure 7). Cependant, selon la sensibilité des espèces végétales aux variations d'humidité et de température, et les conditions hydriques ou géologique du milieu, un changement climatique n'aura pas tout à fait les mêmes conséquences sur deux communautés végétales différentes (Hope et al., 2004 for a review). Ainsi, une zone refuge est caractérisée par la présence d'un plan d'eau permanent autour duquel se développe une végétation exigeante en humidité, et qui sera en partie protégée des changements climatiques. Les petits arbres et les arbustes à croissance rapide (en majorité des espèces héliophiles et pionnières) réagissent très rapidement aux modifications environnementales. À l'inverse, il s'écoulera une centaine d'années entre la mise en place de nouvelles conditions climatiques et le développement de grands arbres comme ceux de la forêt tropicale humide, à croissance plus lente (au moins une trentaine d'années) et sensibles aux conditions de précipitations (Chave, 1999 ; Lebrija-Trejos et al., 2010 ; Wheatley, 1992).

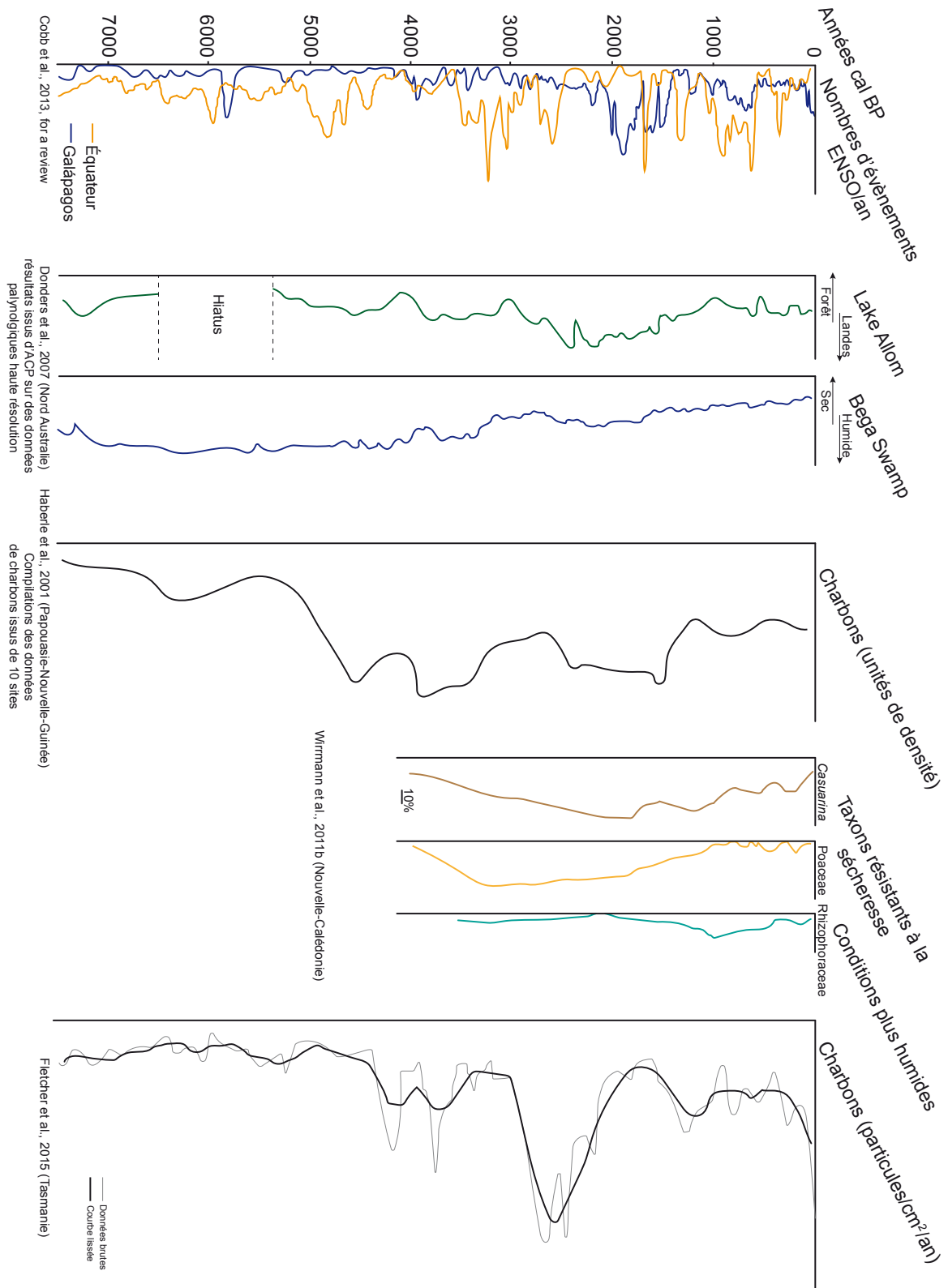


Figure 7 : Évènements ENSO et variations environnementales holocènes dans la région du Pacifique sud-ouest. Des changements dans la végétation illustrant un climat plus sec sont enregistrés en majorité entre 3500 et 1300 ans BP

Des études palynologiques et sédimentologiques ont permis d'identifier la présence et l'impact de cyclones sur la végétation de l'Holocène par des niveaux de sédiments riches en silices et/ou très grossiers et un renouvellement de la végétation par des petits arbres, des buissons et des fougères caractéristiques de conditions humides (Elliot et al., 1998 ; Proske et Haberle, 2012 ; Wirrmann et al., 2006).

### 3.2. Feux naturels et anthropiques

Les feux, d'origine naturelle ou anthropique, peuvent fortement influencer la composition et le temps de résilience\* de la végétation, en particulier en période de sécheresse ou lorsque la fréquence des incendies augmente brusquement. Dans ces circonstances, le feu fragilise la végétation, la rendant plus vulnérable à des changements climatiques (Biagioni et al., 2015 ; Hope et al., 2004, for a review).

Quatre évènements peuvent être à l'origine d'un feu naturel (Scott, 2000). Il s'agit de la foudre, des étincelles produites par des collisions entre roches, du volcanisme et des phénomènes de décomposition chimique de la biomasse. L'impact du volcanisme sur la végétation sera développé dans un point ultérieur (point 3.3). Les étincelles issues de collisions entre roches (Batcheler, 1967) constituant la source la plus rare de mise à feu, nous n'exposerons pas ce cas.

La foudre, fréquente en milieu tropical, survient lors des orages et des tornades, en particulier avec les premières pluies, au début de la saison humide. C'est à cette période que la foudre engendrera les incendies les plus importants, du fait de la végétation desséchée. L'incendie provoqué par la foudre tombée sur une zone de végétation humide sera de bien plus faible ampleur (Stott et al., 2011, for a review).

En période de sécheresse (saison sèche ou évènement El Niño), lorsqu'une grande quantité de biomasse sèche qui se trouve au sol ferment, le feu peut alors se déclencher de manière spontanée (Scott, 2000). Ce phénomène se produit communément en pleine saison sèche, plutôt qu'au début ou à la fin de cette saison, au moment où la matière organique est très sèche et où les espèces végétales décidues ont perdu leurs feuilles (Nalamphun et al., 1969). L'intensité et la taille de ce type de feu est d'autant plus importante que la biomasse accumulée est grande (Gill et al., 1990, for a review ;

Whitlock et al., 2010). Cependant, dans le Pacifique, les feux, même en période sèche, font office d'exception avant l'arrivée de l'Homme (Spriggs, 2010, for a review).

À long terme (de plusieurs années à des décennies), le climat et les variations climatiques ne constituent pas un facteur de déclenchement direct des incendies, mais pourront influencer le régime des feux\* en modifiant la quantité, le taux d'humidité et le type de biomasse accumulée (Whitlock et al., 2010).

L'impact d'un incendie diffère selon les espèces végétales touchées. Ainsi, le feu favorise l'extension des herbacées au détriment des arbres (Gill et al., 1990 for a review ; Schnell, 1971 ; Vannièrre, 2001) : lors d'un incendie, la destruction des semis inhibe le développement de la végétation ligneuse, alors que les nombreuses graines d'espèces d'herbacées, protégées dans le sol des hautes températures, vont permettre aux plantes vivaces de survivre. Les températures, lors d'un feu, restent modérées près du sol alors qu'elles sont les plus importantes 1 à 2 m au dessus du sol. Enfin, les herbacées et les espèces buissonnantes héliophiles profitent de l'ouverture de la végétation pour coloniser la zone incendiée. La succession végétale est similaire après le passage d'un feu d'origine naturelle ou anthropique. Les feux, quand ils ne se répètent pas de façon rapprochée, favorisent une certaine biodiversité en renouvelant la végétation (Haberle et al., 2001 ; Rowe, 2014).

Le feu constitue un des outils de l'action anthropique sur l'environnement. La mise à feu volontaire d'une végétation permet à l'Homme de chasser, favorise le développement d'espèces herbacées recherchées pour la cueillette et rend la terre fertile pour l'agriculture (agriculture sur brûlis). Une agriculture sur brûlis comporte une phase de débroussaillage par le feu, suivie d'une période de culture, principalement des tubercules (taro, igname), puis d'une étape de mise en jachère, suffisamment longue pour permettre l'apparition d'une strate arborée (Mertz et al., 2009, for a review). À l'heure actuelle au Vanuatu, la plupart des feux déclenchés par l'Homme sont utilisés pour l'agriculture sur brûlis, encore très répandue (Blanco et al., 2013). Ces incendies d'origine anthropique permettraient d'éliminer des micro-organismes potentiellement dangereux pour les plantations et de conserver la biodiversité naturelle des cultures (Bourdy et Caporalino-Djian, 1994 ; Padoch et Pinedo-Vasquez, 2010 ; Rerckasen et al.,

2009, for a review). Cependant, ces feux en période de sècheresse sont plus difficilement maitrisables.

Les incendies déclenchés par l'Homme ont un effet plus dévastateur sur une végétation peu soumise à des feux naturels, en présence d'une forte quantité de biomasse accumulée, plutôt que sur une végétation régulièrement brûlée. L'Homme s'adapte à son environnement et le modifie selon ses besoins, en favorisant des départs de feux répétés en période sèche (Whiltock et al., 2010).

La détermination des micro-charbons va permettre de fournir des informations sur le type de combustible brûlé et l'intensité des feux (voir chapitre Méthodologie). Il est possible, bien que toujours complexe, de déduire l'origine naturelle ou anthropique d'un feu dans un enregistrement grâce à l'étude des marqueurs de l'impact des activités humaines sur l'environnement (sédiments ou grains de pollen et spores). Un changement de la végétation, comme un développement des plantes herbacées ou des plantes cultivées, ou un accroissement du taux de sédimentation, associé à une forte augmentation de la concentration en micro-charbons peut être interprété comme la signature de feux d'origine humaine (Denham et Haberle 2008 ; Haberle et al., 2012 ; Hope et al. 2009, for a review ; Horrocks et al., 2008 ; Stevenson, 2004). Des paléoincendies peuvent être enregistrés dans des contextes climatiques qui ne sont pas nécessairement propices aux feux, suggérant l'influence de l'Homme (Lim et al., 2014 ; Rowe et al., 2013 ; Whitlock et al., 2010). Il arrive cependant que les informations obtenues dans les enregistrements sédimentaires ne soient pas suffisantes pour déterminer l'origine des feux (Marlon et al., 2013, for a review ; Wirmann et al., 2006).

### 3.3. Impact de la tectonique et du volcanisme sur la végétation

Les surrections tectoniques, seules ou combinées avec des variations eustatiques\* ou hydro-isostatiques\*, déplacent la ligne de rivage et sont à l'origine de modifications de la végétation côtière. Ainsi, une diminution des grains de pollen de mangrove et de littoral, associée à un changement de faciès sédimentaire sont observés dans le Pacifique sud-ouest autour de 3000 ans BP et témoignent d'un recul de la mer (Fall, 2005 ; Wirmann et al., 2011a, 2011b).

Les particules émises (aérosols) lors d'une éruption volcanique ont une incidence sur le climat local et la biodiversité à court et moyen terme (plusieurs dizaines d'années). Dans un premier temps, les grandes retombées de cendres ou les feux déclenchés par les hautes températures des laves dégradent fortement la végétation. La présence des aérosols dans l'atmosphère bloque une partie des radiations solaires et refroidissent la surface de la terre de 0.1°-0.2°C (Crowley, 2000). Les cendres sont composées de molécules pouvant rendre l'eau douce toxique et favorisant les pluies acides, aggravant la destruction de la végétation (Frogner Kockum et al., 2006 ; Hoffman, 2007). Cependant, les terres fertiles issues de la dégradation des projectiles volcaniques vont par la suite favoriser le renouvellement des espèces végétales. Les volcans du Vanuatu étant pour la plupart à caractère phréatomagmatique\* ou explosif (site Smithsonian Institution Global Volcanism Program), la végétation est principalement dégradée par les particules éjectées lors des éruptions (bombe, ponce ou cendres) plutôt que par des incendies déclenchés par la très haute température de la lave.

L'impact des éruptions volcaniques sur la végétation du sud-ouest Pacifique peut être déterminé grâce à des enregistrements sédimentaires holocènes, provenant pour la plupart de Papouasie-Nouvelle-Guinée (Jago et Boyd, 2005 ; Lentfer et al., 2010 ; Parr et al., 2009 ; Torrence, 2012). Ces analyses nous indiquent que le type de volcan et l'intensité des émissions de matériel éruptif ne sont pas les seuls facteurs à l'origine des modifications de la végétation lors d'une éruption. Il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres environnementaux comme la topographie, le climat, la diversité végétale présente avant l'éruption, de possibles activités humaines ou la composition chimique du matériel volcanique. À titre d'exemple, sous un climat humide, les pluies éliminent rapidement les cendres volcaniques et un important dépôt d'aérosols n'aura que peu d'impact sur la végétation. La fréquence des éruptions influence la diversité végétale de la même manière que la fréquence des feux : les espèces sont plus sensibles à une succession d'éruptions rapprochés dans le temps qu'à des éruptions isolées de plus forte ampleur.

#### 3.4. Les activités humaines

Une modification des conditions environnementales, comme des variations climatiques ou des éruptions, seraient, au moins en partie, à l'origine des déplacements

de populations de la Papouasie-Nouvelle-Guinée vers l'est du Pacifique (voir point 2.1.). Cependant, l'arrivée d'habitants sur des îles vierges peut aussi être à l'origine de modifications des conditions environnementales sur les archipels du sud-ouest Pacifique. Ces populations devront s'adapter à leur nouveau milieu, le modifier pour le rendre habitable ou se déplacer à nouveau.

La biodiversité relativement faible des îles à l'est de la Papouasie-Nouvelle-Guinée ne permet pas à une population de s'installer à long terme dans cette région sans une base économique horticole (Kirch, 1997, for a review). Toutes les populations d'Océanie Lointaine, à l'exception de la Nouvelle-Zélande, pratiquent la production de nourriture non céréalière, favorisant la culture de fruits/noix et des tubercules jusqu'au moment des premiers contacts européens (Bellwood, 2011). Bien que les activités horticoles ne laissent peu ou pas de traces archéologiques, les plantes utilisées peuvent être identifiables à l'aide des études de restes végétaux, d'isotopes stables et d'analyses linguistiques (e.g. Crowther, 2005 ; Horrocks et al., 2009, 2013 ; Kinaston et al., 2014b ; Osmond, 1998 ; Valentin et al., 2010b, 2014).

Le régime alimentaire des populations Lapita a été mixte, principalement basé sur des ressources issues de la pêche et de la cueillette, avec une activité horticole relativement faible et le contrôle de quelques animaux, comme le cochon et le poulet (Allen, 2007 ; Horrocks et Bedford, 2005 ; Kinaston et al., 2014b ; Valentin et al., 2010b). La plante *Piper methysticum*, dont les tubercules sont utilisés dans la préparation d'une boisson rituelle originaire du Vanuatu appelée kava, aurait été mis en culture peu de temps après l'arrivée des premières populations Lapita (Lebot et al., 1997, for a review). La faible présence de l'horticulture\* lors de la période Lapita peut s'expliquer par le temps nécessaire aux plantes cultivées, introduites par les premiers colons, pour qu'elles puissent fournir suffisamment de nourriture à toute une communauté (Walter et al., 2003). Cette stratégie de subsistance, très dépendante des ressources marines, est riche en protéines. Mais elle a pu être à l'origine de carences alimentaires, comme la déficience en vitamine C observée chez les individus enterrés à Teouma (Buckley et al., 2014).

Les études archéologiques montrent que les sites d'occupations Lapita semblent avoir été occupés sur une courte période de temps. Il est possible que ce type de site, en bord de mer et au vent (facilement accessible en pirogue à voile) soit moins adapté à une

population plus sédentaire que les Lapita (Bedford, 2006b). De plus, une diminution du niveau de la mer vers 3000 ans BP a entraîné un recul des mangroves, des récifs côtiers et donc des ressources qu'ils généraient. Les populations auraient alors migré vers l'intérieur des terres, vers des zones moins sèches et plus protégées que le bord de mer, et auraient donc adapté leur alimentation (Carson, 2008 ; Hope et al., 1999). Des conditions climatiques plus humides, favorisant le développement de l'horticulture, pourraient aussi être à l'origine d'un changement de régime alimentaire entre les populations Lapita et post-Lapita (Valentin et al., 2014). Cette modification se serait opérée plus rapidement sur des îles de grande taille, comme à Viti Levu, dans l'archipel des Fiji (Field et al., 2009). La nouvelle stratégie de subsistance s'est principalement basée sur une consommation de légumes riches en amidon (taro et igname), favorisant une intensification de l'horticulture (Kinaston et al., 2014a ; Martin et Steadman, 1999 ; Valentin et al., 2014). Ainsi, la banane, introduite par les populations de culture Lapita, ne sera cultivée de façon importante qu'à partir de 2800 ans BP au Vanuatu (Horrocks et al., 2009 ; Kennedy, 2008). Une présence significative de protéines d'origine marine est toujours marquée chez les insulaires, malgré l'installation massive de l'horticulture. Cette alimentation semble avoir peu changé tout au long de la préhistoire de l'archipel.

L'introduction et l'installation de nouvelles espèces animales (poulet, cochon, chien) et végétales (taro, banane, igname) modifient les conditions environnementales des îles où s'est établi l'Homme. Mais les populations Lapita n'ont pas toujours volontairement influencé leur environnement : les rats, partis avec les premiers colons, ont été les prédateurs de petits oiseaux vivants sur ces îles isolées du Pacifique sud-ouest, et ont détruit l'environnement dans lequel vivaient leurs proies (Athens et al., 2002).

Si des espèces animales ont rapidement disparues peu de temps après l'arrivée des populations Lapita, la période post-Lapita est surtout marquée par des changements de végétation. Ces importantes modifications du paysage pourraient témoigner d'une augmentation démographique qui aurait poussé les populations à changer leur régime alimentaire (Anderson, 2002). Une augmentation des taxons de végétation dégradée et des micro-charbons révèle une modification du paysage qui serait due aux activités humaines. Ce changement est observé dans la plupart des enregistrements après 2700 ans BP, avec le développement de l'horticulture, mais certains sites montrent de telles modifications dès 3000 ans BP (eg. Dotte-Sarout, 2015 ; Fall, 2005, 2010, for a review ;



Hope et al., 1999, 2009, for a review ; Horrocks et Bedford, 2005 ; Horrocks et al., 2009 ; Stevenson, 2004 ; Wirrmann et al., 2011b - figure 8). Des analyses paléoenvironnementales ont montré une accélération des processus d'érosion à partir de 2200 ans BP. Cette destruction peut résulter de l'intensification de l'agriculture (jardins et zones d'élevages), liée à une installation plus permanente des populations (Hope et al., 2009, for a review ; Spriggs, 2010, for a review).

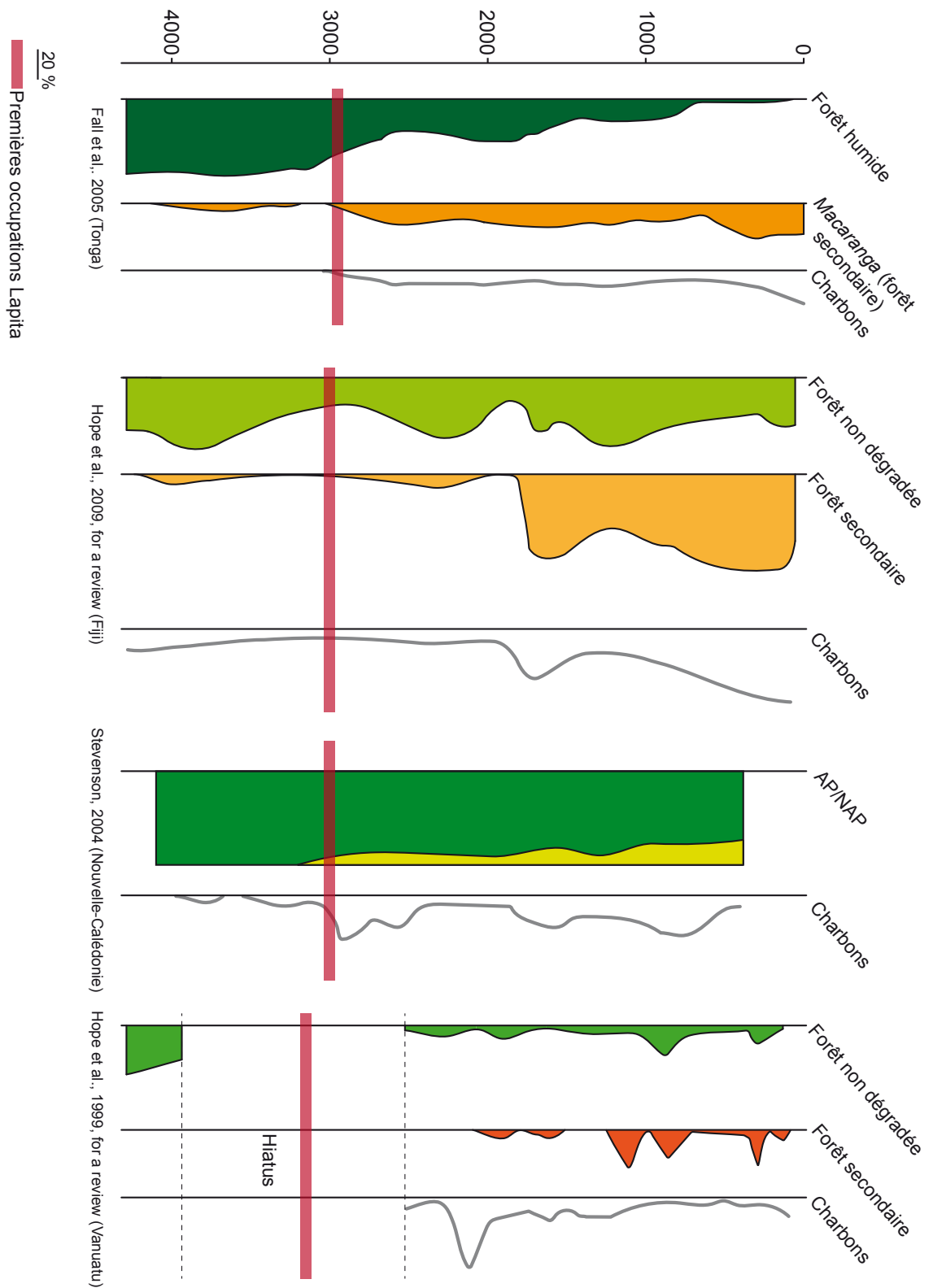


Figure 8 : Paléovégétation avant et après l'arrivée de l'Homme sur quatre îles du Pacifique sud-ouest. Afin de faciliter la comparaison entre les sites, les courbes de charbons exposent des données qualitatives (absence/présence de feux)



## Méthodologie

### 1. Échantillonnage des carottes

Les prélèvements sur le terrain sont réalisés à l'aide d'un carottier Martin à vibration (Martin et Flexor, 1989), permettant d'enfoncer un tube en aluminium fixé sur un tripode. Une tige flexible relie le tube à un moteur, les vibrations issues du moteur sont transmises par la tige au tube, et permettent à ce dernier de s'enfoncer. Au moins deux personnes doivent tenir le tube afin de l'orienter correctement. Il est ensuite retiré du sol par un treuil relié au tripode. Afin de faciliter le transport, chacun des tubes ne mesure pas plus de 2 mètres de long et l'assemblage est réalisé par des rivets sur le terrain. Une fois le tube sorti, il est découpé en tronçons sur lesquels sont notés la date, l'orientation (haut et bas), la profondeur et les flèches de gravités, dirigées vers le bas. Chaque tronçon est fermé dans le but de garder les sédiments humides.

Les carottes sont stockées en chambre froide à 5°C au laboratoire LOCEAN à l'IRD de Bondy. Les informations concernant le lieu et la date de prélèvement sont conservées dans une base de données. L'ouverture d'une carotte est réalisée par une scie circulaire, qui permet de couper le tube sur toute sa longueur et sur les deux cotés opposés, en prenant garde à ne pas abimer le sédiment. La carotte est séparée en deux en reliant les incisions effectuées par la scie grâce à un fil en nylon. Dès l'ouverture, des photos sont prises afin d'identifier les variations de couleur avant la perte d'humidité des sédiments. La moitié de la carotte est conservée sous plastique comme archive, l'autre moitié est échantillonnée. Des sédiments sont prélevés tous les centimètres, pesés, puis placés dans une coupelle numérotée et mis à l'étuve pendant une semaine. Une fois sec, les sédiments sont à nouveau pesés. Les échantillons ont ensuite été partagés entre les différentes analyses : sédimentologie, géochimie, analyse de la micro-faune, datation et palynologie.

### 2. Datation radiocarbone

#### 2.1. Datation du sédiment

Pour chaque carotte prélevée, des échantillons de sédiments, de restes végétaux, de bois et de coquilles ont été envoyés au laboratoire LMC14 (UMS 2572, CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC) à Saclay et au laboratoire Beta Analytic Inc à Londres afin de les dater par spectrométrie de masse.

Ces échantillons sont examinés à la loupe binoculaire afin d'éliminer d'éventuels contaminants (poils ou racines par exemple) et un traitement Acide/Base/Acide est ensuite réalisé.

Les résultats issus du spectromètre de masse permettent de calculer une date en BP avec une erreur sur la mesure, tenant compte de l'erreur statistique et de la variabilité des résultats.

## 2.2. Datation du matériel sporopollinique

Lorsque nous réalisons des datations  $^{14}\text{C}$  sur des sédiments éoliens, lacustres ou marins, le risque de contamination des échantillons (sédiments remaniés, présence de matière organique allochtone ou stockage de carbone ancien - effet réservoir marin\*) doit nécessairement être pris en compte. La datation des grains de pollen apparaît comme une solution pour réduire ce risque (Newnham et al., 2007). Le matériel sporopollinique, se déposant peu de temps après avoir été produit, nous permet de dater précisément le sédiment dans lequel il est contenu. Plusieurs méthodes permettant d'extraire les grains de pollen des sédiments existent : par attaque chimique et tamisage (Brown et al., 1992 ; Zhou et al., 1999), par densimétrie (Vandergoes et Prior, 2003 ; Newnham et al., 2007 ; Proske et al., 2015), par pipetage (Mensing et Southon, 1999) ou en utilisant des instruments particuliers (Long et al., 1992, Tennant et al., 2013). Nous nous sommes basés sur ces méthodes afin d'obtenir le protocole le plus adapté à notre cas.

Nous avons choisi de dater les grains de pollen, les spores et les micro-charbons (de taille importante afin d'éviter des confusions - voir point 3.3.) des échantillons les plus abondants en matériel sporopollinique provenant de l'enregistrement du marais d'Emaotfer (Tfer06). Ces échantillons, très riches en matière organique, ont déjà subi les attaques chimiques nécessaires à l'analyse palynologique, dont la méthode de Lüber. Ainsi les particules carbonatées sont éliminées et la matière organique amorphe est

éclaircie, permettant de mieux observer les grains de pollen, les spores et les micro-charbons. Voici le protocole qui a été employé :

- 1) Placer chaque culot dilué avec de l'eau distillée dans une boîte de pétri
- 2) À l'aide d'une pipette pasteur, extraire le matériel à dater de l'échantillon et le placer dans un microtube ou un pilulier en verre
- 3) Sécher le matériel à l'étuve

Malgré la simplicité de la méthode, son inconvénient majeur est le temps d'extraction des grains de pollen, des spores et des micro-charbons pour obtenir assez de matériel (entre 2 et 4 mg) afin de dater l'échantillon. Ainsi, il a été nécessaire de réaliser un tel prélèvement pendant trois semaines, plusieurs heures par jour, de manière à disposer d'une quantité suffisante de matériel pour 2 niveaux extrêmement riches en pollen. Cette méthode n'est donc employée qu'occasionnellement et sur quelques échantillons.

### 2.3. Réalisation d'un modèle d'âge

Les dates obtenues par le laboratoire doivent être calibrées afin de corriger la quantité de  $^{14}\text{C}$  des variations de l'activité solaire, du champ magnétique et la combustion des matériaux fossiles (enrichis en  $^{12}\text{C}$ ). La calibration est réalisée à l'aide du logiciel Oxcal 4.2.2 (Bronk Ramsey et Lee, 2013) avec les données de l'hémisphère sud (courbe ShCal13) et une probabilité de 2 sigmas. La séparation hémisphère nord/hémisphère sud des datations  $^{14}\text{C}$  est représentée par la ZCIT (Zone de Convergence InterTropicale). Même si la ZCSP (Zone de Convergence Sud Pacifique), qui prolonge la ZCIT, est présente au niveau du Vanuatu 6 mois par an environ, nous avons choisi de garder la correction hémisphère sud afin de pouvoir comparer nos résultats avec d'autres îles du Pacifique sud ouest, dont la Nouvelle-Calédonie, située au sud du Vanuatu (22°S). Pour la même raison, les dates issues de la littérature sont aussi corrigées selon la courbe ShCal13.

Les modèles d'âges ont été réalisés en reliant les dates par une courbe lissée polynomiale appliquant l'algorithme de Stineman, et parallèlement à l'aide de statistiques bayésiennes (P\_sequence model, Oxal 4.2.2). Les courbes issues des deux méthodes étant identiques, nous avons choisi, pour la facilité de la lecture, de présenter

la courbe lissée polynomiale comme modèle d'âge. Les courbes bayésiennes se trouvent en Annexe 3A et B.

### 3. Analyse palynologique

#### 3.1. Production, dispersion et conservation des grains de pollen et des spores

Les spores participent à la reproduction des Ptéridophytes, de Bryophytes et des Thallophytes. Le cytoplasme de la spore est entouré d'une paroi composée de deux couches : la couche inférieure, l'endosporium et la couche extérieure, le perisporium. La couche supérieure peut être lisse ou porter des ornements.

Le grain de pollen contient le gamétophyte mâle des angiospermes et des gymnospermes. Il est entouré d'une paroi, le sporoderme, composé de deux couches : l'intine, la couche interne qui disparaît après la mort de la cellule et l'exine, la couche externe constituée d'une molécule organique très résistante, la sporopollénine (Zetzsche et Kälin, 1931), qui permet au grains de résister à diverses dégradations, dont les processus taphonomiques.

Selon l'espèce végétale, trois principaux modes de dispersions sont possibles (Erdtman, 1992 ; Faegri et Iversen, 1975) :

- La dispersion par le vent (anémophilie).
- La dispersion par l'eau (hydrophilie).
- La dispersion par les animaux, plus généralement les insectes (entomophilie).

Ces modes de dispersions ne sont pas exclusifs : le transport par les animaux est aussi possible pour les grains de pollen habituellement dispersé par le vent par exemple.

Contrairement aux plantes entomophiles, un faible pourcentage de grains de pollen et de spores issus des plantes anémophiles et hydrophiles va permettre la reproduction (Faegri et Iversen, 1975). La majorité de la pluie pollinique\* produite par les plantes anémophiles et hydrophiles sera soit dégradée, soit déposée et conservée dans le sédiment. En revanche, seul un faible pourcentage de grains de pollen provenant des plantes entomophiles sera déposé sur le sol. Les espèces entomophiles risquent donc d'être sous-représentées dans les enregistrements polliniques, alors que les espèces anémophiles et hydrophiles seront sur-représentées.

La conservation et la fossilisation des grains de pollen et des spores, bien que

facilitées par leur membrane résistante, dépend de l'environnement de dépôt : la plus grande richesse sporopollinique est observée dans des sédiments riches en matières organiques et peu oxydés (tourbière, lac, marais, lagunes, fond des océans - Reille, 1990). Des grains de pollen présentant une forte proportion de sporopollénine et une exine épaisse sont aussi mieux préservés (Habinga, 1964).

### 3.2. Traitements chimiques

L'extraction du matériel sporopollinique suit un protocole basé sur la méthode développée par Sittler (1955). La difficulté majeure a été d'éliminer la forte quantité de matière organique brun-noir des échantillons étudiés pour cette thèse, nous obligeant parfois à ajouter une attaque au KOH à froid, à colorer le culot avec de la safranine, voire à utiliser la méthode de Lüber afin d'éclaircir la matière organique (Guillet et Planchais, 1969). L'acide fluorhydrique étant un acide extrêmement dangereux, des précautions supplémentaires à celles appliquées lors d'une manipulation de produits chimiques ont été prises : des gants en néoprènes, des lunettes et un masque sont nécessaires.

- 1) Prélever entre 0,5 et 1,5 g de matériel, selon la teneur en matière organique du sédiment
- 2) Tamiser à 200  $\mu\text{m}$  pour éliminer la fraction grossière
- 3) Ajouter de l'HCl dilué à 50% à froid afin d'éliminer la fraction carbonatée  
Attendre la fin de la réaction avant de continuer
- 4) Rincer à l'eau distillée, centrifuger pendant 6 min à 3000 t/min
- 5) Éliminer la silice par l'attaque à l'HF à 70% pendant au moins 24h
- 6) Décantier et placer le minimum d'HF possible dans les tubes à centrifuger.  
Compléter les tubes avec de l'HCl, puis centrifuger pendant 6 min à 3000 t/min
- 7) Ajouter de l'HCl dilué à 50%, à chaud (bain-marie pendant 10-15min) pour éliminer les fluosilicates
- 8) Centrifuger et répéter l'opération 7) deux fois au moins et jusqu'à que le surnageant soit transparent
- 9) Rincer à l'eau distillée, centrifuger pendant 6 min à 3000 t/min
- 10) Ajouter du KOH dilué à 10% à chaud (1/2 h au bain-marie à 50°C) afin d'éliminer la matière organique non pollinique



- 11) Rincer à l'eau distillée, centrifuger pendant 6 min à 3000 t/min
- 12) Filtrer à 5 µm pour les échantillons riches en matière organiques, récupération du refus de tamis
  - Méthode de Lüber (optionnel - à utiliser sur une partie du culot)
  - a. Ajouter 5 à 6 gouttes d'HCl à 50% dans 100 ml de HNO<sub>3</sub> à 50%
  - b. Déposer quelques ml de la solution sur chaque culot et attendre 1 à 3 min
  - c. Rincer abondamment à l'eau distillée et centrifuger
- 13) Sécher et ajouter un volume connu de glycérol phénolé
- 14) Prélever 50 µl de culot pour le montage entre lame et lamelle

Au cours de cette thèse, j'ai eu l'occasion de travailler à l'herbier de Nouméa (IRD) fin 2013, dans le but de prélever des fleurs de la végétation néo-calédonienne et surtout vanuataise, afin de résoudre certains problèmes de détermination rencontrés dans les échantillons fossiles (voir point 3.3.). Près de 200 échantillons d'espèces différentes ont pu être rapportés au laboratoire. Lors de cette mission, j'ai aussi pu aller à Efate afin de connaître mon terrain. Un inventaire floristique a été effectué avec l'aide de Chanel Sam, conservateur à l'herbier de Port Vila en 2005 et lors de ma mission de 2013 (Annexe 4). Cependant à cette période, un moratoire nous interdisait de sortir le moindre échantillon (végétaux, sédiment ou graines par exemple) de l'archipel du Vanuatu.

Les grains de pollen ont été extraits des fleurs par une acétolyse classique en se basant sur la méthode d'Erdtman (1960).

- 1) Les fleurs sont disséquées afin de retirer les étamines. Si les fleurs sont petites, elles sont prises entières
- 2) Dans un tube à essai en verre propre et sec, verser 9/10 d'anhydride acétique, puis 1/10 d'acide sulfurique pur
- 3) Verser quelques gouttes de ce mélange sur chaque échantillon, puis placer les tubes au bain-marie, en faisant attention a ne pas mettre en contact l'eau et le mélange ; écraser le matériel tout en mélangeant la solution ; retirer les tubes quand l'eau bout et que le surnageant est devenu jaune foncé-brun
- 4) Centrifuger pendant 8 min à 1800 t/min
- 5) Rincer à l'acide acétique pur, puis centrifuger pendant 8 min à 1800 t/min

- 6) Répéter l'étape 5
- 7) Rincer à l'eau distillée, puis centrifuger pendant 8 min à 1800 t/min
- 8) Retourner les tubes pour sécher le culot ; celui-ci est récupéré par un cube de gélatine glycérolisée, puis posé sur une lame
- 9) Le mélange gélatine – culot est luté entre lame et lamelle par de la paraffine sur une plaque chauffante

### 3.3. Détermination du matériel

Chaque espèce végétale produit un type de grain de pollen particulier. En étudiant la forme et la taille du grain, la disposition, la forme et le nombre d'ouvertures (ouvertures permettant l'émission d'un tube pollinique) ainsi que l'ornementation de l'exine, le palynologue peut identifier une famille, le plus souvent un genre, voire une espèce végétale en observant un grain de pollen au microscope optique (Annexe 5). Il est donc possible de reconstituer la paléoflore pour déterminer les environnements passés. L'analyse pollinique repose sur trois hypothèses majeures (Reille, 1990) :

- La pluie pollinique représente la végétation qui l'a produite et la couverture végétale est à l'image des conditions écologiques régionales, c'est-à-dire de la nature du sol et des variations climatiques. Mais selon le mode et la distance de dispersion, ainsi que la production de grains de pollen, certaines espèces peuvent être sur- ou sous-représentées dans les diagrammes polliniques. Afin d'interpréter les résultats le plus finement possible, il est important, dans la mesure du possible, de connaître ces données pour les taxons rencontrés dans nos échantillons (Annexe 6).
- L'image de la végétation n'est pas influencée par le dépôt ni la conservation des grains de pollen. Bien qu'il soit admis que la végétation est représentée de façon homogène dans les échantillons pour un même site, nous l'avons vu, la résistance de l'exine à la fossilisation et à l'oxydation dépend des espèces. L'interprétation doit se faire avec prudence.
- Il est nécessaire de déterminer un nombre de grains de pollen par échantillon statistiquement fiable afin d'obtenir une image représentative de la végétation. Il a été démontré que la validité statistique d'une analyse pollinique est atteinte à partir de l'identification de 150 à 300 grains de pollen, avec au moins 100 grains

identifiés en plus d'un taxon dominant et répartis sur au moins 20 taxons différents (Faegri et Iversen, 1989, Reille, 1990).

Les lames palynologiques sont observées au microscope optique à oculaire \*10 et objectifs \*25 ou \*40. Les déterminations des grains de pollen sont réalisées avec un objectif \*100 à immersion. L'identification s'effectue par comparaison avec des grains actuels grâce à une collection de référence de plus de 2000 lames conservées au laboratoire LOCEAN à l'IRD de Bondy, à une collection de référence mise en ligne par le Department of Archaeology and Natural History of the Australian National University (<http://www.apsa.anu.edu.au>) et à l'aide des références suivantes : Bulalacao (1997), Erdtman (1986) et Ledru et Sémah (1992). La relative pauvreté des échantillons nous a demandé, durant cette thèse, d'analyser entièrement chaque lame palynologique, afin d'obtenir des résultats statistiquement fiables.

Cependant, la flore riche et partiellement connue du Vanuatu complique la reconnaissance des grains de pollen. Un autre problème se pose lorsque une même morphologie pollinique au sein d'une famille (Euphorbiaceae, Rutaceae, Rubiaceae) ou d'une famille à l'autre (Meliaceae, Sapotaceae) peut correspondre à des exigences écologiques très différentes. L'impossibilité, bien souvent, de pousser l'identification plus loin que le genre peut rendre les conditions écologiques difficiles à déterminer, car suivant les espèces, l'habitat peut être très différent (*Casuarina* ou *Pandanus* par exemple). Il est donc nécessaire de relever le plus grand nombre de caractères visibles sur les grains de pollen de la collection de référence et de s'aider des associations végétales afin de reconstituer le plus fidèlement possible les paléoenvironnements (Punt et al., 2007). Le cas des genres *Mallotus* et *Macaranga*, de la famille des Euphorbiaceae, est présenté dans la figure 1.

#### 3.4. Diagrammes polliniques et interprétations

Après détermination, le pourcentage de chaque taxon est calculé par rapport à l'ensemble des grains de pollen d'arbres (AP, Arboreal Pollen) et d'herbacées (NAP, Non Arboreal Pollen) duquel sont retirés les spores, les taxons indéterminés et indéterminables. Ces derniers sont calculés par rapport à la somme totale, donc l'ensemble des grains de pollen et des spores déterminés et non déterminés.

Le calcul de la concentration en spore et en grains de pollen donne des informations sur les variations d'abondance et sur le transport du matériel sporopollinique. La concentration est exprimée en grains par gramme et le calcul est basé sur la méthode de Cour (1974).

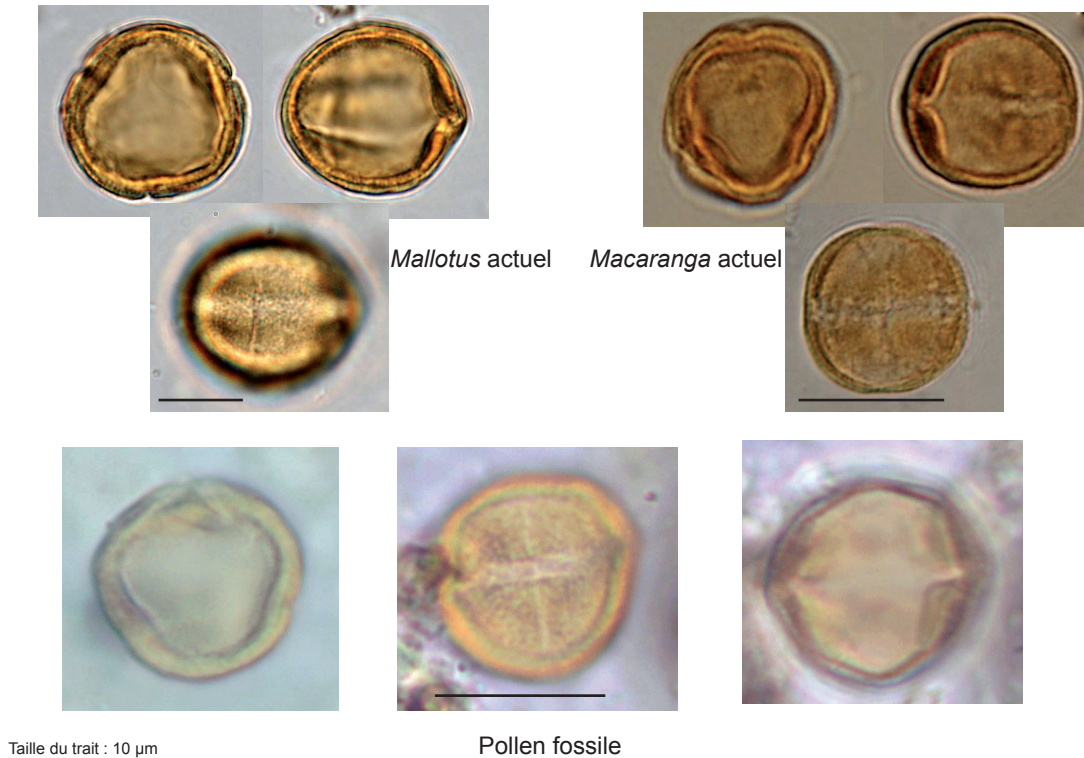


Figure 1 : Grains de pollen de *Mallotus*, *Macaranga* actuels et grains de pollen d'Euphorbiaceae fossiles. La comparaison de taille, la morphologie et l'absence de *Mallotus* dans le relevé botanique nous fait supposer que le pollen fossile en photo est *Macaranga*. Ces deux genres ont les mêmes exigences écologiques (photo grains de pollen actuels de la collection de référence de l'IRD Bondy).

Tout d'abord, le pourcentage du culot observé est calculé comme suit :

$$F = (v \times l \times 100) / (V \times L)$$

F (%) : pourcentage du culot observé ;

v (μl) : volume déposé sur la lame ;

l (mm) : largeur totale balayée (champ de l'objectif x nombre de lignes observées) ;

V (μl) : volume total du culot ;

L (mm) : largeur utile de la lame (17000 μm dans notre cas).

Pour que le comptage soit significatif, il faut que F soit supérieur à 0,1 %.

La richesse en grains de pollen et en spores est obtenue de la façon suivante :

$$R = (n \times 100) / (m \times F)$$

R : richesse moyenne du sédiment exprimée en nombre de grains par gramme ;

n : nombre de spores et grains de pollen comptés ;

m (g) : poids du sédiment sec traité.

La superficie du site d'étude est en relation directe avec l'information enregistrée dans les carottes sédimentaires : les grains de pollen déposés au fond d'une dépression de grande taille située dans un paysage ouvert auront une origine régionale, alors qu'une dépression de petite taille enclavée dans un relief ne pourra représenter que des changements de végétation locaux. De plus, les données paléoenvironnementales issues de carottes prélevées au milieu d'un plan d'eau sont plus fiables que celles issues de carottes prélevées sur la berge. Des variations du niveau de l'eau peuvent fortement perturber le dépôt sur la rive, à l'origine d'un remaniement des sédiments. Ces indications sont applicables à la plupart des marqueurs environnementaux.

### 3.5. Représentation des résultats

Les spectres polliniques sont obtenus en calculant le pourcentage de chaque taxon pour tous les échantillons. La juxtaposition verticale des spectres d'un même enregistrement constitue un diagramme pollinique qui permet de visualiser les changements de végétation au cours du temps.

Les diagrammes polliniques issus des deux carottes lacustres étudiées pour cette thèse ont été réalisés sous la forme d'histogrammes plutôt que de courbes, dans le but de mettre en évidence la discontinuité des enregistrements. Afin de garder les diagrammes lisibles, les taxons observés le plus fréquemment (plus de 5 occurrences dans un enregistrement) sont regroupés selon leur écologie dans les diagrammes synthétiques.

Six grands groupes de végétation ont pu être définis selon les affinités écologiques des taxons identifiés sur les lames palynologiques (Backer et Bakhuizen van den Brink Jr., 1965 ; Lebot et Cabalion, 1986 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Siméoni, 2009 for a

review ; Smith, 1979 ; Wheatley, 1992). La détermination des grains de pollen étant majoritairement possible jusqu'au genre, les noms d'espèces ne seront pas présentés ici.

- La forêt tropicale humide, très diversifiée et composée de grands arbres, lianes et fougères arborescentes, caractérise de fortes précipitations (jusqu'à 400 mm/mois). Ce groupe comprend les taxons *Syzygium* (Myrtaceae), les Araliaceae *Meryta* et *Schefflera*, *Podocarpus* (Podocarpaceae) et *Nauclea* (Rubiaceae). Les genres *Veitchia* (Arecaceae), *Dysoxylum* (Meliaceae), *Freycinetia* (Pandanaeae) et *Tapeinosperma* (Primulaceae) sont observés moins régulièrement. À plus haute altitude, l'augmentation de l'humidité et la baisse de température favorise le développement d'*Ascarina* (Chloranthaceae), de *Geissois* et *Weinmania* (Cunoniaceae) et de l'herbe *Peperomia* (Piperaceae).
- La forêt semi-décidue rassemble les arbres et les buissons adaptés à des précipitations plus faibles que la forêt humide (jusqu'à 320 mm/mois). Ce groupe est principalement composé de *Derris*, *Desmodium* et *Pterocarpus* (Fabaceae), d'*Acacia*, *Adenantha* et *Entada* (Fabaceae, sous-famille Mimosoidae) et de *Celtis* (Ulmaceae). Les Sapindaceae (*Arytera*, *Cupaniopsis*, *Dodonea*, *Ellatostachys*, *Guoia*, *Pometia* et *Sapindus*), *Kleinhovia* (Malvaceae) et les Rutaceae (*Euodia*, *Micromelum* et *Psydrax*) sont moins fréquents.
- La forêt secondaire se développe si une perturbation (naturelle ou anthropique) affecte l'une des deux forêts décrites ci-dessus. Elle se compose de plantes pionnières héliophiles, *Acalypha*, *Claoxylon*, *Macaranga*, *Mallotus*, *Homalanthus* (Euphorbiaceae) et de l'Ulmaceae *Trema*. Ces genres comptent parmi les premiers végétaux à coloniser un milieu après une catastrophe, d'origine naturelle ou anthropique, qui détruit la végétation. Ces plantes supportent des conditions environnementales instables (climat variable, érosion ou glissement de terrain par exemple). Les genres *Commersonia* (Malvaceae), *Geniostoma* (Loganiaceae) et les lianes de la famille des Malpighiaceae sont des plantes pionnières plus rarement observées. Les genres *Aceratium*, *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae), *Ficus*, *Malaisia* (Moraceae), *Piper*, *Macropiper* (Piperaceae), *Dendrocnide* et *Pipturus* (Urticaceae) se développent plus lentement et apparaissent après la colonisation du milieu par les plantes pionnières.
- Les plantes introduites par l'Homme sont en grande majorité du genre *Musa* (Musaceae, famille, entre autres, des bananiers) ainsi que *Phyla* (Verbenaceae),

aujourd'hui invasif mais utilisé auparavant en médecine traditionnelle et à des fins ornementales. Il est aussi possible d'observer certains *Hibiscus* cultivés (Malvaceae), *Vitis* (Vitaceae) et *Artocarpus* (Moraceae).

- La végétation de marécage est principalement composée d'herbacées, les Cyperaceae, les Amaranthaceae et les Nymphaeaceae. Les genres *Alisma* (Alismataceae), *Potamogeton* (Potamogetonaceae) et *Typha* (Typhaceae) sont moins présents. Certaines espèces telles que *Barringtonia racemosa* (Lecythidaceae) et *Hibiscus tiliaceus* (Malvaceae) constituent le sous-bois du marécage.
- La végétation de mangrove, située à la zone de balancement des marées, est composée uniquement par *Rhizophora*, *Bruguiera* et *Ceriops* (Rhizophoraceae) et par *Sonneratia* (Sonneratiaceae).
- La végétation du littoral regroupe les taxons *Cocos* (Arecaceae), *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae), *Calophyllum inophyllum* (Calophyllaceae), *Excoecaria* (Euphorbiaceae – aussi en arrière-mangrove) et les lianes rampantes *Ipomoea* (Convolvulaceae). Les arbres *Barringtonia asiatica* (Lecythidaceae), *Argusia*, *Terminalia* (Combretaceae) et *Guettarda* (Rubiaceae) sont moins fréquents.
- Les familles des Asteraceae et les Poaceae représentent un nombre important d'espèces herbacées cosmopolites. Cependant, ces taxons sont généralement considérés comme héliophiles, présents dans des milieux ouverts et des zones à faibles précipitations.

### 3.6. Traitements statistiques

La liste des logiciels utilisés lors de cette thèse se trouve en Annexe 7.

#### 3.6.1. Analyse cluster

Le logiciel Tilia a été utilisé pour construire les différents diagrammes polliniques ; les spectres sont placés dans un diagramme en fonction de l'âge. Afin de déterminer de façon objective les zones polliniques, une analyse statistique visant à regrouper les données par ensembles homogènes ("cluster" en anglais) a été réalisée. Cette analyse statistique, "Constrained Cluster Analysis by Sum of Squares" (CONISS) mesure la

distance mathématique entre les taxons polliniques avec un pourcentage supérieur ou égal à 1% (Grimm, 1987).

### 3.6.2. Analyse en Composante Principale (biplot)

Il y a parfois des incertitudes lors de l'analyse et de l'interprétation du diagramme pollinique. Dans les zones tropicales, les résultats obtenus d'après une étude palynologique sont difficiles à interpréter, du fait de la complexité de la flore. Dans notre cas, la situation particulière des sites complique l'interprétation : les marais, les lacs sont des zones refuges, des taxons de milieu humide peuvent être observés même au cours de période sèche. Il est donc parfois nécessaire de compléter notre étude par une Analyse en Composante Principale (ACP), afin d'apporter des informations supplémentaires sur la place d'un taxon et ses relations au sein des environnements reconstitués. L'ACP est un outil statistique servant à établir des groupements d'unités statistiques et à mettre en évidence les liens entre les différentes variables (Aitchison et Greenacre, 2002). En palynologie, les spectres et les taxons correspondent respectivement aux unités statistiques et aux variables. Les unités statistiques sont représentées en points, alors que les variables constituent des trajectoires ou vecteurs. L'ACP est statistiquement fiable si il y a plus de 15 taxons et de 4 spectres analysés (Aitchison et Greenacre, 2002). On obtient deux graphiques (biplot), où les variables et les unités statistiques s'organisent autour de deux axes, représentant les deux facteurs influençant le plus la distribution de ces variables et de ces unités statistiques. La visualisation de ces graphiques nous permet d'obtenir plusieurs types d'informations :

- les liens entre les variables : des trajectoires proches et d'orientation similaire indiquent des variables proches ;
- la répartition des unités statistiques : ils sont regroupés selon leurs variables les plus développées ;
- les liens entre les axes et les variables/les unités statistiques : plus un élément est visuellement proche d'un axe, plus celui-ci est influencé par cet axe.

On ne retient que deux dimensions (axes) pour réaliser les biplots, mais l'ACP produit une multitude d'axes. L'analyse des tableaux de corrélations variables-facteurs renseigne sur les relations (corrélés ou anti-corrélés) entre les variables selon tous les axes issus de l'ACP. Ces tableaux sont en Annexe 8A et 8B.



Cette analyse statistique permet de valider les zones polliniques obtenues d'après l'interprétation du diagramme - la répartition des spectres devant être proche de celle déterminée par CONISS - mais aussi de discriminer les taxons influençant le plus la distribution de chaque zone.

### 3.6.3. Quantification climatique

La quantification des paléoclimats à partir des données palynologiques constitue un apport important à la reconstruction des paléoenvironnements. Plusieurs techniques existent, adaptées à différents contextes. Nous avons choisi d'utiliser des fonctions de densité de probabilité, afin de relier l'espace climatique\* des taxons actuels à des températures et des précipitations passées (Schözel, 2005).

Il n'existe pas, pour le Vanuatu, de base de données associant chaque espèce végétale de l'archipel à son espace climatique. Pour notre étude, nous avons dû relier les coordonnées géographiques (données GPS ou nom de lieux) des végétaux récoltés par les herbiers et les cartes de distributions de la végétation aux données météorologiques actuelles, afin de relier les espèces végétales retrouvées à Efate à des conditions climatiques spécifiques (Annexe 9). Les données de localisations n'étant pas toujours extrêmement précises (les données GPS sont disponibles uniquement pour des récoltes récentes) et la détermination pollinique se faisant au genre, il y a un risque d'arrondissement des données paléoclimatiques obtenues avec cette méthode.

Notre approche consiste ainsi à identifier un intervalle de température et de précipitation probable pour un temps  $t$ , correspondant à la zone des recouvrements des espaces climatiques de chaque taxon présent dans l'échantillon daté de  $t$  (figure 2). Déterminer uniquement les minima et maxima possibles de températures et de précipitations ne suffisant pas, les résultats étant trop dispersés et peu précis, il a été nécessaire de calculer l'espérance mathématique et la précision des 4 variables (température minimum, température maximum, précipitation minimum, précipitation maximum), en prenant en compte les pourcentages de chaque taxon. Cette démarche augmente la finesse des résultats, mais n'exclue cependant pas les biais liés aux processus taphonomiques, à la production et dispersion des grains de pollen, différents selon les espèces.

Les calculs statistiques et leur interprétation sont basés sur les hypothèses suivantes :

- l'actualisme : les exigences écologiques des taxons n'ont pas sensiblement changé depuis le début de l'Holocène ;
- l'espace climatique actuel d'un taxon obtenu est représentatif des exigences écologiques de ce taxon sur toutes les îles du Vanuatu ;
- la médiane des températures et des précipitations pour une espèce correspond aux conditions climatiques optimales au développement de cette plante ;
- la forêt secondaire prospérant partout où la végétation est dégradée, les espaces climatiques des taxons qui la composent sont très larges et risquent de diminuer la précision des intervalles de températures et de précipitations. Les calculs seront donc effectués avec et sans ces taxons ;
- du fait de l'inertie de la végétation, celle-ci ne répond pas immédiatement à un changement de conditions environnementales : il y aura donc un décalage entre les températures et précipitations obtenues par notre méthode et des données météorologiques produites grâce à d'autres marqueurs.

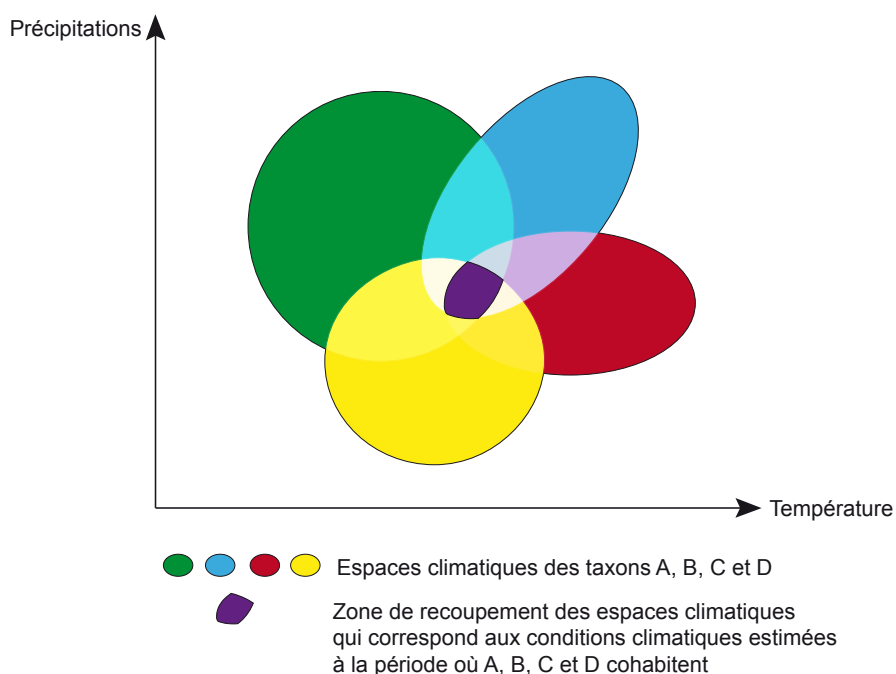


Figure 2 : Principe de la quantification climatique

À partir des espérances et des précisions des températures et des précipitations, il est possible de réaliser des Cartes Topologiques Auto-Organisatrices. Ces cartes présentent de manière graphique les intervalles de températures et de précipitations passées les plus probables pour chaque taxon. Ces cartes sont en Annexe 10.

#### 4. Analyse des micro-charbons

##### 4.1. Production, dispersion et conservation des micro-charbons

Des éléments végétaux brûlés, issus d'arbres ou d'herbes, sont les résidus témoins d'incendies naturels ou anthropiques. La quantité de micro-charbons produite par un feu dépend d'un grand nombre de facteurs : le type de matériel brûlé (bois, herbes), le type de feu, sa localisation par rapport au site, sa durée, son intensité et sa température (Patterson et al., 1987). Les feux peuvent avoir comme origine la foudre, le volcanisme ou les phénomènes de décomposition chimique (Scott, 2000). La couverture végétale influence également le développement des feux (Millspaugh et al., 2000) : ils sont favorisés par une accumulation de biomasse - liée à un développement d'une forêt par exemple - et dépendent de la composition floristique. Les forêts ouvertes, caractérisées par une forte présence d'herbacées et de buissons, sont régulièrement soumises aux incendies, contrairement aux forêts denses humides, dont le sous bois n'est pas ou peu composé d'herbacées et dont les plantes sont riches en eau. Le climat a aussi un rôle à jouer dans la formation des feux : l'insolation, la mousson, et la variabilité climatique interannuelle modifient le régime des pluies, la température et la composition de l'atmosphère, à l'origine de changements dans la végétation (Daniau et al., 2013 ; Power et al., 2008).

L'eau et le vent sont reconnus comme les principaux agents de dispersion des micro-charbons depuis leur lieu de production jusqu'à la zone d'accumulation (Clark, 1988). Les fragments les plus gros (>100 µm) sont peu dispersés par le vent, leur présence atteste d'un feu plutôt local, contrairement aux fragments plus petits (<25 µm), produits en plus grande quantité lors d'un incendie (Clark et Patterson, 1997 ; Whitlock et Larsen, 2001 for a review). Cependant, des charbons de grande taille peuvent être transportés par l'eau sur de longues distances (Nichols et al., 2000 ; Scott et al., 2009 for a review), et les grands réservoirs\*, avec un important réseau hydrographique, sont plus

susceptibles de les collecter que les plus petits (Blarquez et al., 2013 ; Carcaillet et al., 2007).

Les micro-charbons sont fragiles et peuvent être fragmentés lors du dépôt et des extractions (Clark, 1984) : les charbons de taille inférieure à 500  $\mu\text{m}$  seraient en partie issus de fragmentations de charbons plus grands, les feux locaux risquent ainsi d'être sous-estimés. De plus, selon l'espèce, la conservation des charbons de bois ne sera pas la même. Les micro-charbons ne représenteraient qu'une image partielle du matériel produit par les incendies. Il convient donc d'interpréter les résultats issus de ce marqueur avec prudence et de quantifier la totalité des vestiges de charbons, afin de reconstituer l'intégralité des informations issue de la présence de ces éléments brûlés.

#### 4.2. Traitements chimiques

Pour les charbons dont la taille ne dépasse pas 160  $\mu\text{m}$ , leur extraction se produit en même temps que celle des grains de pollen et des spores (Clark, 1984). Cela permet la conduite de l'analyse palynologique en même temps que l'étude des micro-charbons.

Au dessus de 160  $\mu\text{m}$ , les micro-charbons de bois subissent un traitement particulier afin de ne pas les abîmer (Carcaillet et al., 2001).

- 1) Prélever environ 0,5 g de sédiment
- 2) Éclaircir le sédiment : ajout de NaOCl dilué à 5% et de sodium hexamétaphosphate à chaud
- 3) Mélanger la solution régulièrement jusqu'à dissolution complète du sédiment
- 4) Tamiser le sédiment à 160  $\mu\text{m}$  avec un tamis en nylon
- 5) Étudier le refus de tamis avec une loupe binoculaire et un logiciel d'analyse d'image

#### 4.3. Détermination du matériel

Un charbon, observé au microscope optique ( $\times 400$ ) ou à la loupe binoculaire, est totalement noir, opaque et possède un contour anguleux. Les fibres végétales sont observables pour les charbons de taille supérieure à 160  $\mu\text{m}$ . Le problème majeur de détermination se pose donc pour les charbons de taille inférieure à 160  $\mu\text{m}$  (Clark,

1988). Étant donné les limites de l'observation oculaire dans l'identification de petits éléments, la détermination de ces petits charbons est source d'erreur. Même si des structures cellulaires peuvent parfois être observées, la plupart des micro-charbons observés au microscope correspondent à des particules noires et opaques et peuvent être confondus avec d'autres particules, comme des minéraux de couleur noire (pyrite). De plus, les critères de déterminations varient d'un chercheur à un autre. Il faut donc se définir des critères et s'y tenir, afin de diminuer le plus possible les biais liés à l'identification des micro-charbons inférieurs à 160 µm. L'erreur que nous faisons lors de la détermination étant toujours la même, pour un chercheur le biais est donc similaire à chaque échantillon et le résultat final reste cohérent.

#### 4.4. Interprétation

Pour les particules inférieures à 160 µm, le comptage est réalisé sur la lame palynologique à l'aide d'un micromètre gradué. Il s'agit d'obtenir une estimation de la surface totale des charbons, comptabilisée par gramme de sédiment, après en avoir déterminé un nombre statistiquement satisfaisant. On parle alors de "point count method" (Clark, 1982). L'aire A occupée par les charbons dans l'échantillon est calculée comme suit :

$$A = (P \times l \times a \times V) / (v \times m)$$

P (%) : probabilité de rencontrer un charbon sur la lame

l (mm) : largeur utile de la lamelle (dans notre cas 24 mm)

a (mm) : longueur utile de la lamelle (dans notre cas 50 mm)

V (µl) : volume total de culot dilué dans la glycérine

v (µl) : volume déposé sur la lame

m (g) : poids du sédiment traité

A est en mm<sup>2</sup>/g.

Mais ces petits charbons, facilement transportés, peuvent provenir de sols érodés et se déposer bien après l'épisode de feu dont ils sont originaires. Ainsi, il est fréquent d'observer des charbons inférieurs à 160 µm sur toute la carotte étudiée. Seuls les grands pics de concentration doivent donc être pris en compte (Blarquez et al., 2013 ; Burjachs et Expósito, 2014 ; Carcaillet et al., 2007).

Pour les particules supérieures à 160  $\mu\text{m}$ , le logiciel d'analyse d'image va permettre de déterminer, pour chaque charbon, la surface, la plus grande longueur, la plus grande largeur et le rapport largeur/longueur (W/L). Le nombre de charbons total et la somme des surfaces des charbons comptabilisés donnent des informations sur la fréquence des feux et les changements dans la biomasse brûlée (Aleman et al., 2013). La taille moyenne des particules renseigne sur la localisation des feux (point 3.1.). Le rapport W/L dépend aussi du type de combustible (arbres ou herbes). Les herbacées produisent des particules plus allongées que les arbres lors d'un incendie, ainsi un rapport W/L <0,5 correspond à un feu issu majoritairement d'herbes, alors qu'un rapport W/L >0,5 indique que la biomasse brûlée est principalement composée d'arbres (Daniau et al., 2013 ; Umbanhowar et Mcgrath, 1998). Afin de faciliter la comparaison des moyennes des rapports W/L, les fréquences relatives seront calculées pour les valeurs de chaque échantillon.

L'analyse des micro-charbons de bois doit être combinée à une étude de la couverture végétale, afin de relier les activités humaines, les changements climatiques et la composition végétale à l'histoire des feux. Une étude pluridisciplinaire va aussi mettre en évidence des processus taphonomiques liés à la végétation : une forêt entourant un site étudié représente un "filtre" pour les charbons et ce sont majoritairement des petites particules qui atteindront le site (Aleman et al., 2013). De plus, une analyse pluridisciplinaire permettra de s'assurer que les variations de concentration en micro-charbons ne soient pas liés à des processus sédimentologiques, comme un changement du taux de sédimentation ou un remaniement (Blarquez et al., 2013 ; Daniau et al., 2013).

#### 4.5. Représentation des résultats

Les résultats issus des calculs exposés dans le point précédent sont représentés sous forme de graphes, dont les ordonnées correspondent aux âges.

Le caractère très ponctuel d'un feu pose un problème : la sédimentation des charbons étant quasiment contemporaine de leur production au moment de l'incendie, la méthode d'échantillonnage influence donc grandement la reconstitution de l'histoire des feux. Il est essentiel de travailler avec la meilleure résolution possible et, dans un cas idéal, en

continu (Blarquez et al., 2013). Plus le pas d'échantillonnage est grand, plus les indices d'incendies seront aplanis. Dans le cas d'un échantillonnage discontinu ou de taux de sédimentation faible, il est seulement possible de déterminer la présence/absence de feux pendant une certaine période (Burjachs et Expósito, 2014).

Afin de mettre en évidence le flux de particules carbonisées, nous présentons nos résultats sous la forme de courbes dans le cas d'enregistrements à haute résolution.

## 5. Analyses des phytolithes et des grains d'amidon

### 5.1. Production, dispersion et conservation des phytolithes et des grains d'amidon

#### 5.1.1. Production des phytolithes

Les phytolithes se forment par un dépôt de silice ( $\text{Si(OH)}_4$ ) dans les végétaux. Cette silice est absorbée par les racines et transportée dans la plante grâce aux courants de l'évapotranspiration. Elle se dépose au niveau des cellules de l'épiderme ou des cellules non spécialisées dans le stockage de la silice, dans le cas d'une trop forte évapotranspiration ou d'une trop forte concentration de silice dans la plante. La concentration progressive de la silice est à l'origine d'un gel de silice qui prend la forme de la cellule ou de la paroi de l'épiderme. Ce gel se déshydrate et forme un phytolithe (Sangster et Hodson, 1992 ; Raven, 1983). Le gel qui s'accumule dans les cellules non spécialisées dans le stockage de la silice prend toujours une forme sphérique quelque soit la partie de la plante (tige, feuille, racine) et le taxon qui l'a produite.

#### 5.1.2. Production des grains d'amidon

Les grains d'amidon sont composés de chaînes de molécules de glucose, d'amylose et d'amylopectine. L'agencement de l'amylopectine (organisée en feuillets) et de l'amylose (structure amorphe) est à l'origine de la forme semi-cristalline du grain d'amidon (Gott et al., 2006). L'amidon constitue une réserve pour la plante, qu'elle utilise pour sa croissance, la photosynthèse ou la régénération saisonnière (Cortella et Pochettino, 1994 ; Cronquist, 1982 ; Wang et al., 1998). L'amidon peut être stocké dans les feuilles (chloroplastes), où il sert de réserve pour la nuit ; dans ce cas, les grains d'amidon sont petits et leur forme change peu d'un taxon à un autre. L'amidon peut aussi être accumulé dans des organes de stockage (tubercules, graines, racines), dont les formes varient

selon l'espèce végétale ; les grains présentent alors des formes caractéristiques d'un taxon à l'autre (Piperno et Holst, 1998).

### 5.1.3. Dispersion et conservation des phytolithes et des grains d'amidon

Les phytolithes et les grains d'amidon retournent à la terre à la mort de la plante, leur présence indique donc que la plante dont ils sont issus s'est développée sur place, ou qu'elle a été transportée avant sa décomposition. Ce sont des marqueurs d'une végétation majoritairement locale.

Les facteurs biotiques qui dégradent la matière organique n'affectent pas les phytolithes mais ceux-ci peuvent subir des cassures ou des dissolutions (Bartoli, 1981 ; Rovner, 1988). Ces dégradations dépendent de la taille et de la forme des phytolithes.

Les grains d'amidons supportent la fossilisation mais certains micro-organismes et bactéries présents dans le sol produisent des enzymes capables de détruire les grains. La taille des grains d'amidon influence également la préservation. La plus grande richesse en amidon est observée dans un sol sans trop d'activité biologique, l'idéal étant une sédimentation rapide en milieu anoxique (Barton et Matthews, 2006 ; Gott et al., 2006 ; Haslam, 2004). Les forts taux de sédimentation et la bonne préservation des grains de pollen (favorisée par un milieu pauvre en oxygène) observés pour la carotte du marais d'Emaotfer (point 1.1 du chapitre Résultats) indiquent un milieu adapté à la conservation des grains d'amidon.

## 5.2. Traitements chimiques

Les phytolithes et les grains d'amidon peuvent être extraits en même temps, à condition d'utiliser deux liqueurs de densité différentes (figure 3). Le protocole mis en œuvre résulte d'une adaptation des méthodes de Delhon (2005), Horrocks (2005) et Lentfer et Therin (2006).

- 1) Prélever entre 2 et 5 g de sédiment
- 2) Ajouter de l'HCl dilué à 50% à froid afin d'éliminer la fraction carbonatée. Attendre la fin de la réaction avant de continuer
- 3) Rincer à l'eau distillée, centrifuger



- 4) Déflocculation des argiles : plonger les échantillons pendant 24 à 48 h dans un grand volume de sodium hexamétaphosphate
- 5) Tamiser à 200 µm pour éliminer la fraction grossière
- 6) Rincer à l'eau distillée, centrifuger
- 7) Éliminer la matière organique avec H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dilué à 10% pendant 1/2h
- 8) Rincer à l'eau distillée, centrifuger
- 9) Séparation par densimétrie : ajouter quelques ml de sodium polytungstate de densité 1,7 et centrifugation à petite vitesse (1500 t/min)
- 10) Décantier et placer le surnageant dans un nouveau tube
- 11a) Rincer plusieurs fois à l'eau distillée les surnageants de l'étape 10), centrifuger
- 12a) Filtrer à 5 µm pour les échantillons avec des culots importants
- 13a) Sécher à l'étuve (35°C) et ajout d'un volume connu de glycérol phénolé
- 14a) Prélever 50 µl de culot pour le montage entre lame et lamelle – Séparation des grains d'amidon terminée
- 11b) Attaquer à H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dilué à 10% à chaud pour les culots de l'étape 10). Une fois que l'eau est chaude, retirer les échantillons du bain marie et les laisser dans l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pendant 24 h
- 12b) Rincer à l'eau distillée, centrifuger
- 13b) Sécher à l'étuve (35°C)
- 14b) Séparation par densimétrie : ajouter de quelques ml de sodium polytungstate de densité 2,3 et centrifugation à petite vitesse (1500 t/min)
- 15b) Décantier, garder le surnageant et ajouter un volume connu de glycérol phénolé
- 16b) Prélever 50 µl de culot pour le montage entre lame et lamelle – Séparation des phytolithes terminée

### 5.3. Détermination du matériel

La redondance et la multiplicité des morphotypes pour chaque taxon fait de l'étude des phytolithes et des grains d'amidon une discipline de spécialiste. Nous ne souhaitons pas réaliser une étude quantitative, le but ici est de compléter les données de la palynologie. Les tubercules de taro et d'igname constituent la base de l'alimentation des populations mélanésienne et polynésienne depuis la préhistoire. Afin de favoriser la croissance des tubercules, les fleurs sont coupées et les grains de pollen de taro et

d'igname sont donc rarement retrouvés dans les sédiments. Avec les seules données palynologiques, nous avons peu d'indices directs de la présence ou non d'une culture de ces tubercules au cours du temps.

L'objectif de cette analyse est de déceler la présence de morphotypes typiques de certains taxons : les phytolithes de *Musa*, les grains d'amidon de *Dioscorea* et de *Colocasia* (Annexe 11). C'est pourquoi nous ne développerons pas les problèmes rencontrés lors des déterminations, les méthodes d'interprétation et de représentation des résultats comme nous avons pu le faire pour les grains de pollen, les spores et les micro-charbons.

L'identification s'effectue à l'aide du même microscope optique que pour la palynologie, par comparaison avec des phytolithes actuels grâce à une collection de référence des morphotypes les plus fréquents conservée au laboratoire LOCEAN à l'IRD de Bondy et à une collection de référence de grains d'amidons actuels mise en ligne (<http://clarissacagnato.weebly.com/starch-grain-database.html>). Nous utilisons aussi les références suivantes : Lentfer (2009) et Piperno (2006).

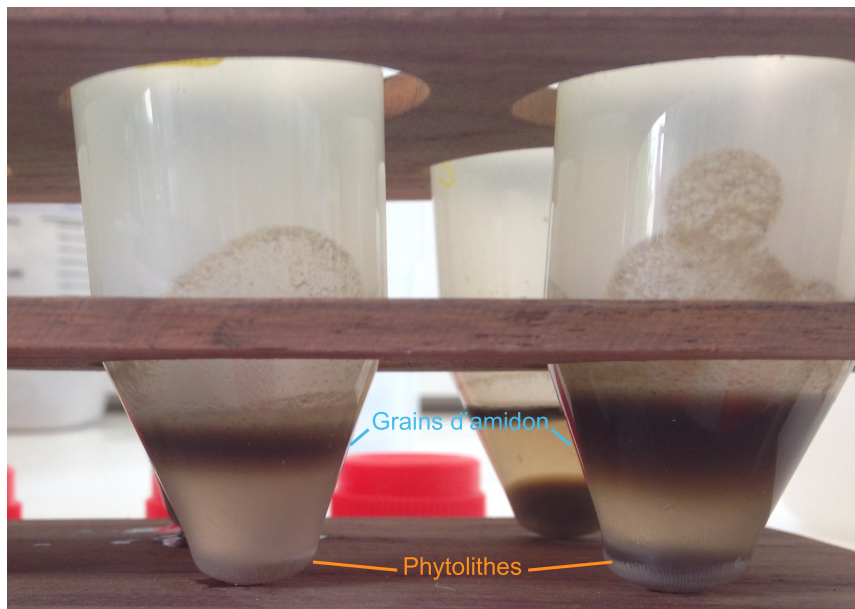


Figure 3 : Séparation par densimétrie des grains d'amidon et des phytolithes



## Résultats des analyses

### 1. La carotte Tfer06

#### 1.1. Lithologie de la carotte et choix des échantillons

La plus longue carotte, Tfer06, datée à sa base de 6670 ans BP, a été prélevée dans le marais d'Emaotfer au sud de l'île (voir le point 1.1. du chapitre Cadre de l'étude).

De la base vers le haut de la carotte, trois faciès sédimentaires majeurs sont observés (Wirrmann et al., 2011a). L'unité I et II sont séparés par un contact horizontal graduel, l'unité II et III par un contact net. Les couleurs des sédiments décrits ci-dessous sont codifiées selon le Munsell Soil Color Charts (1975). Entre 480 et 431 cm de profondeur, la carotte est constituée d'un sédiment argileux riche en matière organique (unité I). Le dépôt est homogène, sa couleur varie du brun clair au foncé (10YR 2/1 à 10YR4/2.5 et 5Y 2.5/1). La densité sèche est comprise entre 0,15 et 0,3 g.cm<sup>-3</sup>.

Le sédiment argileux est remplacée par un gel pauvre en matière organique jusqu'à 150 cm de profondeur (unité II). Ce gel est composé d'une boue fine et compacte, contenant un grand nombre de coquilles de gastéropodes et d'ostracodes. La teinte du dépôt varie de rose à rouge-brun (5YR 2.5/2 à 6/4, et 10YR 5/3 à 10YR 2/1), avec des taches rouges clairs (10R 6/7-7.5R4/8), gris foncés-rouges (2.5YR 3/2) ou blancs (2.5Y8/3). Deux sous-unités peuvent être distinguées : l'unité IIA (430-282 cm), de densité sèche comprise entre 0,1 et 0,4 g.cm<sup>-3</sup>, et composée d'une très grande quantité de coquilles d'ostracodes ainsi que de fragments de feuilles ; l'unité IIB (281-151 cm), présentant une densité sèche de 0,1 à 0,2 g.cm<sup>-3</sup>.

Sur les 150 derniers cm s'est déposée de la tourbe (unité III), de couleur marron foncé (7.5YR 2/0) à noir (10YR 2/1, 5YR 2,5/1). La densité sèche, autour de 0,1 g.cm<sup>-3</sup>, est la plus basse de toute la carotte.

Plusieurs couches de téphras, de 1 à 5 cm d'épaisseur, témoignent d'activités volcaniques proches de l'île d'Efate. Ces téphras sont localisés à 292, 277-282, 142-143 et 42-43 cm de profondeur.

Nous avons sélectionné les échantillons en fonction de la richesse et de la diversité en grains de pollen détectés lors d'une étude palynologique préliminaire, réalisée par A-M. Sémah. Une analyse à haute résolution étant souhaitée, la vitesse de sédimentation a aussi influencé notre choix du pas d'échantillonnage (voir point 1.2.). Ainsi, le faible taux de sédimentation de l'unité I ne favorisant pas une haute résolution, peu d'échantillons ont été retenus pour ce niveau. L'unité II est marquée par des taux de sédimentation les plus élevés de la carotte, mais les grains de pollen sont souvent mal préservés, et des échantillons ont été prélevés tous les 5 à 15 cm, en fonction de la présence de niveau stériles. La forte vitesse de sédimentation et la bonne conservation des grains de pollen dans l'unité III nous a permis d'obtenir la meilleure résolution pour ce niveau, avec des échantillons prélevés tous les 2 à 9 cm. Les derniers 25 cm sont composés d'un ensemble de restes végétaux, principalement des Cyperaceae, non propice à la conservation des grains de pollen.

Les analyses sédimentologiques et de micro-faune (voir le chapitre Discussion et Wirrmann et al., 2011a) ont révélé des changements de conditions environnementales aux périodes de transitions de faciès sédimentaires. Afin de mieux détailler les dynamiques environnementales de ces périodes, les échantillons destinés à l'analyse palynologique ont été prélevés tous les cm au niveau des transitions argile-gel et gel-tourbe.

Sur 84 échantillons analysés, 68 ont présenté un signal pollinique statistiquement fiable. Afin de définir au mieux le caractère ponctuel des feux, l'étude des charbons de bois supérieurs à 160  $\mu\text{m}$  a été réalisée sur les 84 échantillons de l'analyse palynologique auquel s'ajoutent 23 autres, pour un total de 107. Nous avons obtenu des résultats pour 83 d'entre eux. L'analyse qualitative des phytolithes et grains d'amidon a été réalisée sur 10 échantillons, dont 8 dans le gel et 2 dans la tourbe.

## 1.2. Modèle d'âge-profondeur de la carotte Tfer06

Les âges radiocarbone de 23 échantillons ont été obtenus sur la carotte Tfer06, et 13 d'entre eux ont été pris en compte dans la réalisation du modèle d'âge-profondeur (tableau 1 et figure 1).

| Profondeur (cm) | Matériel daté           | <sup>13</sup> C (‰) | Âge <sup>14</sup> C conventionnel | Âge années cal BP |
|-----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 30,5            | Pollen                  |                     | Pas assez de matériel             |                   |
| 33,5            | Pollen                  | -26.7               | 350±30                            | 304-457           |
| 47,5            | Pollen                  |                     | Pas assez de matériel             |                   |
| 49,5            | Pollen                  |                     | Pas assez de matériel             |                   |
| 67,5            | Pollen                  | -28.8               | 650±30                            | 549-650           |
| 90,5            | Tourbe                  | -26.6               | 940±30                            | 736-905           |
| 141,5           | Tourbe                  | -21.4               | 1630±30                           | 1382-1543         |
| 159,5           | Bois                    | -23.6               | 1295±30                           | 1074-1269*        |
| 173,5           | Coquille de Thiaridae   | -0.8                | 2985±30                           | 2973-3210*        |
| 173,5           | Restes végétaux         | -23.9               | 1800±30                           | 1585-1740         |
| 192,5           | Restes végétaux         | -26.6               | 1365±30                           | 1184-1296*        |
| 253,5           | Sédiment                | -14.9               | 2620±30                           | 2500-2766*        |
| 264,5           | Restes végétaux         | -29.3               | 1280±30                           | 1069-1266*        |
| 301,5           | Restes végétaux         | -27.4               | 2250±30                           | 2151-2331         |
| 301,5           | Coquille de gastéropode | -7.7                | 2225±30                           | 2096-2316         |
| 348,5           | Bois                    | -27.2               | 2425±30                           | 2329-2701         |
| 376,5           | Restes végétaux         | -28.1               | 2605±30                           | 2497-2759         |
| 420,5           | Sédiment                | -11.4               | 3900±30                           | 4156-4413*        |
| 432,5           | Sédiment                | -19.0               | 3550±30                           | 3650-3883         |
| 441,5           | Bois                    | -28.8               | 3025±30                           | 3006-3326*        |
| 450,5           | Sédiment                | -23.5               | 3925±30                           | 4161-4421         |
| 461,5           | Sédiment                | -18.3               | 4025±30                           | 4296-4527         |
| 478,5           | Sédiment                | -23.65              | 5900±60                           | 6496-6845         |

Tableau 1 : Âges radiocarbone obtenus sur la carotte Tfer06 et calibrés selon Oxcal 4.2.2. et la courbe ShCal13. Les astérisques indiquent les échantillons qui ne sont pas pris en compte dans le modèle d'âge-profondeur

En plus de 3 échantillons ne contenant pas assez de matériel sporopollinique et de charbons pour qu'ils puissent être datés, 7 autres n'ont pas été pris en compte dans le modèle d'âge-profondeur. Le choix de les mettre à l'écart a tout d'abord été justifié par l'observation de ces échantillons : certains sédiments semblent avoir été remaniés et plusieurs bois, coquilles et restes végétaux présentent des traces de transports, nous

permettant de les caractériser comme des éléments allochtones. De plus, le logiciel Oxcal a déterminé statistiquement ces 7 échantillons comme des outliers (valeurs aberrantes).

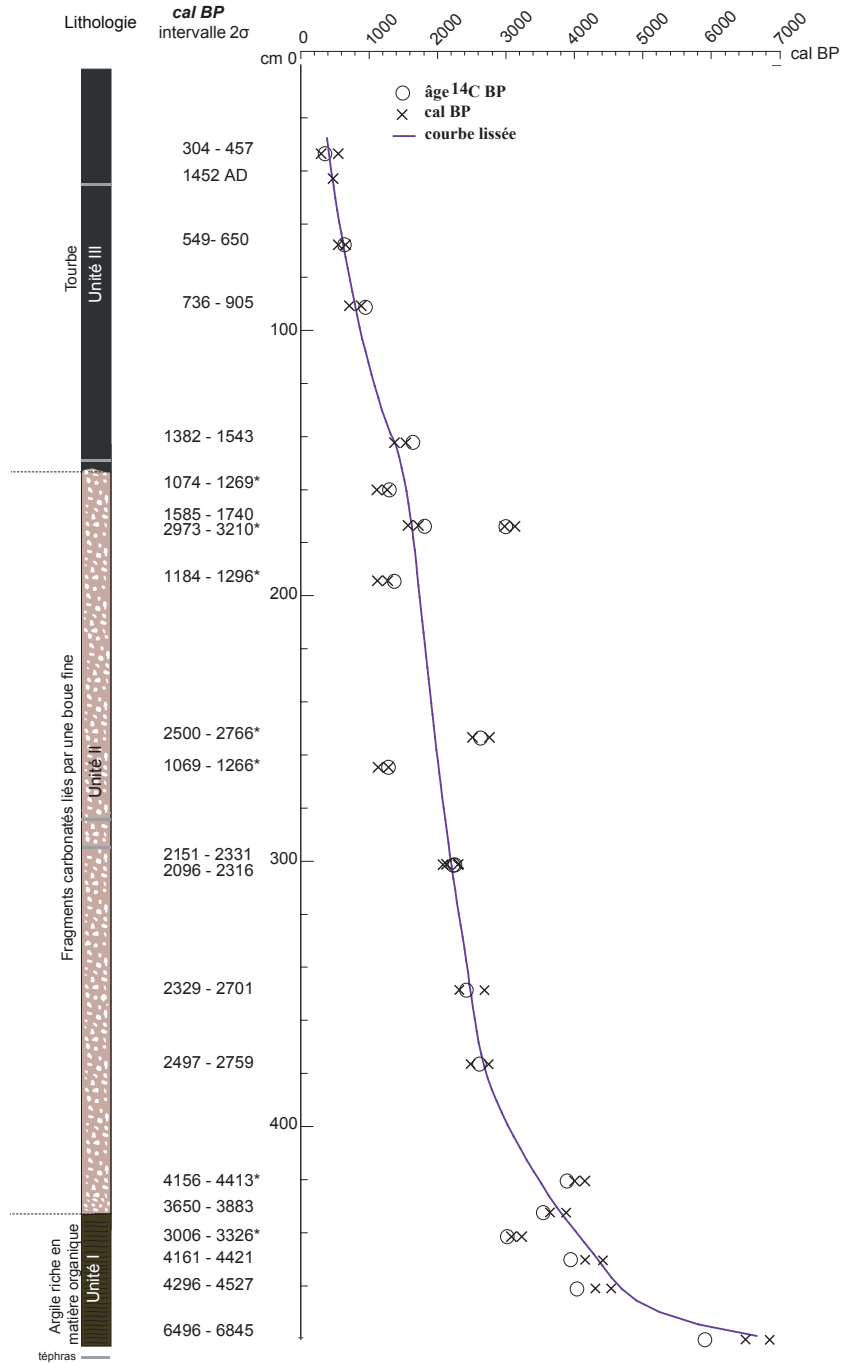


Figure 1 : Lithologie et modèle d'âge-profondeur de la carotte Tfer06. Les dates calibrées (sauf celles avec les astérisques dans le tableau 1) sont ajustées par une courbe lissée polynomiale afin de réaliser le modèle

Il est nécessaire, avant de continuer, de faire quelques remarques sur le modèle d'âge. Au niveau de la transition Unité I/Unité II (vers 430 cm de profondeur), plusieurs dates présentent des valeurs chronologiquement incohérentes : nous avons choisi de ne pas prendre en compte la date correspondant à la profondeur 441,5 cm. Il existe en effet un risque que l'échantillon (du bois) ait été transporté, et donc qu'il soit allochtone. De plus, si nous avons décidé d'intégrer cette date à la courbe, deux autres âges auraient été écartés, afin que le modèle ne fournisse pas de valeurs aberrantes. Ces deux autres échantillons sont situés dans l'Unité I (profondeur 450,5 et 460,5 cm), et celle-ci semble être issue d'un dépôt régulier.

Grâce au modèle d'âge-profondeur ainsi obtenu, les taux de sédimentation moyen des différentes unités de la carotte Tfer06 ont pu être calculés.

Unité I : 0,17 mm/an

Unité IIA : 1,4 mm/an ; Unité IIB : 2,1 mm/an

Unité III : 1,2 mm/an

### 1.3. Résultats de l'analyse des mousses

Afin d'interpréter au mieux les résultats du diagramme pollinique, l'analyse de la pluie pollinique actuelle a été analysée grâce à trois échantillons de mousses, dont deux prélevée sur la rive et le troisième dans le sous-bois sur le plateau à l'ouest du marécage (figure 2). Les résultats sont comparés à l'inventaire floristique (Annexe 4). Les grains de pollen contenus dans une mousse pourrait représenter une pluie pollinique continue accumulée entre 1 et 3 ans (Heim, 1971 ; Hicks et al., 2001).

Les résultats de l'analyse des trois mousses sont représentés sous forme de diagrammes en secteurs (figure 3).

Les mousses 1 et 2, prélevées sur la rive ouest du marais, à une dizaine de mètres d'intervalle, enregistrent une majorité de grains de pollen de Cyperaceae, de *Macaranga* et des spores de fougères. Les Cyperaceae comme les fougères sont en effet très présents dans la zone de prélèvement des mousses. Les genres *Macaranga*, *Macropiper* et les familles Moraceae et Urticaceae, caractéristiques de la forêt secondaire et régulièrement identifiés lors du relevé botanique, sont bien représentés dans la pluie pollinique. En revanche, certains taxons fréquemment rencontrés sur le terrain, comme sur la rive du marécage (*Barringtonia racemosa*, *Pandanus* et *Hibiscus tiliaceus* – Annexe 12), ceux la



forêt semi-décidue (Fabaceae, Mimosoidae et *Celtis*), et les Poaceae de la savane anthropisée sont plus rarement observés dans les mousses.

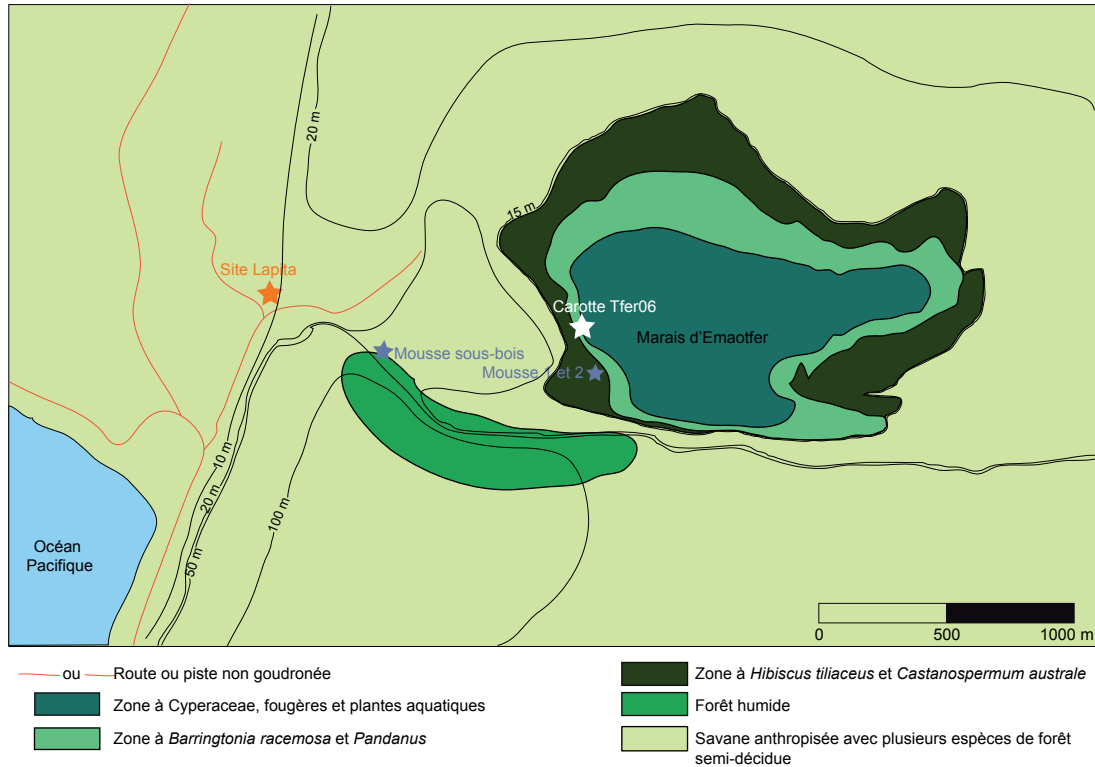
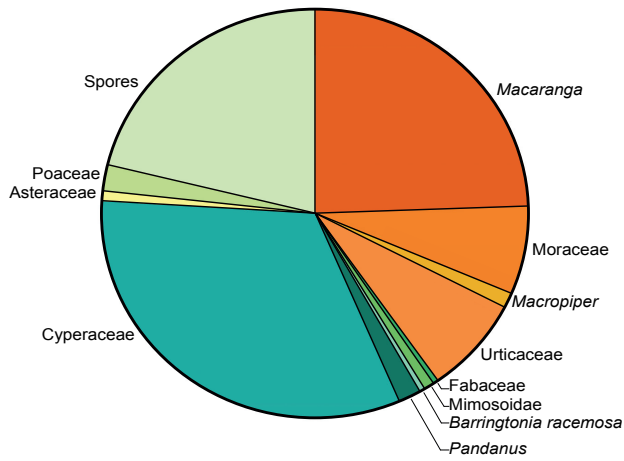


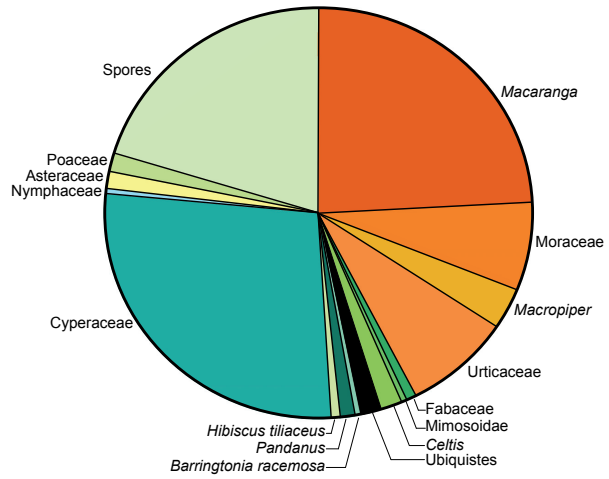
Figure 2 : Localisation de la carotte Tfer06, des trois mousses étudiées pour cette thèse et de la végétation autour du site, d'après les relevés botaniques de 2005 et Siméoni, 2009, for a review

La mousse prélevée dans le sous-bois près de la forêt humide montre une prédominance des spores de fougères. Bien que toutes les espèces observées ne soient pas retrouvées dans la pluie pollinique, la mousse enregistre un pourcentage de taxons de la forêt secondaire, de la forêt semi décidue (*Garuga* s'ajoutant aux espèces déjà citées) et des Poaceae conforme au relevé botanique dans cette zone (Annexe 4). Exception faite de *Veitchia* et de *Podocarpus*, la proximité de la forêt humide n'est pas illustrée dans l'analyse palynologique.

Cette étude ne permet pas une modélisation car les données botaniques concernant la région sont incomplètes et les études de mousses sont rares. Cependant, en comparant l'analyse palynologique des mousses et les relevés botaniques de la région, nous



**Mousse 2**



**Mousse sous-bois**

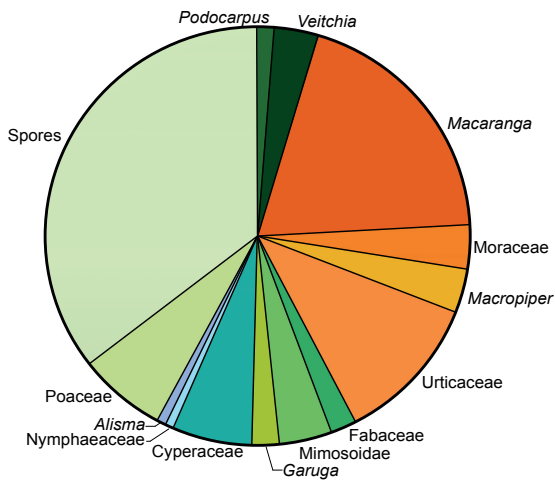


Figure 3 : Diagrammes en secteurs des trois mousses prélevées près du marais d'Emaotfer

pouvons déterminer des tendances de sur-ou sous-représentations de certains taxons dans la pluie pollinique.

L'analyse palynologique des mousses donne une image proche de la végétation recensée sur le terrain, mais la production et la dispersion des grains de pollen de certains taxons sont à l'origine de biais dans la pluie pollinique.

Du fait de la forte abondance des Cyperaceae, les plantes de marécages seront exclues du calcul des pourcentages, afin de ne pas sous-estimer les variations des autres taxons. Le genre *Macaranga* est dominant, et bien qu'il ait été observé lors de l'inventaire floristique du plateau, il est sans doute sur-représenté dans la pluie pollinique.

*Macaranga tanarius*, l'espèce recensée lors du relevé botanique, fleurit plusieurs fois par an, dont en juin et juillet (Wheatley, 1992), date à laquelle les mousses ont été prélevées. La pollinisation du genre *Macaranga* est assurée par des petits insectes, les thysanoptères, souvent emportés par le vent, chaque individu pouvant transporter plusieurs centaines de grains de pollen (Fiala et al., 2011 ; Ishida et al., 2008). La forte dispersion et production des grains de pollen de *Macaranga* entraînent une surestimation, dans le diagramme, du groupe des Euphorbiaceae dans lequel il est compris (voir le chapitre Méthodologie).

La faible dispersion et production en grains de pollen de certains taxons du marécage ou de la savane anthropisée (Annexe 6) expliquent leur absence ou leur modeste présence dans la pluie pollinique. Par exemple, *Barringtonia* produit peu de pollen et celui-ci est transporté par des papillons nocturnes et des chauves-souris (Jansen et Cardon, 2005), ne favorisant pas un important dépôt des grains sur le sol. Les grains de pollen de *Pandanus* sont produits en grande quantité, mais les fleurs tombent au pied de l'arbre, libérant le pollen dans les environs immédiats de la plante (Botineau, 2010, for a review). De plus, la végétation située sur les rives du marais agit comme un "filtre" sur la pluie pollinique venue des alentours, limitant l'afflux de grains de pollen vers le plan d'eau. Ainsi, bien que la pluie pollinique produite par la savane anthropisée soit bien enregistrée dans les mousses 1 et 2, les taxons produisant le moins de grains de pollen risquent d'être sous-estimés, alors qu'ils sont mieux représentés dans la mousse du sous-bois.

L'absence de taxons se développant sur le ressaut topographique (forêt humide – figure 2) dans les mousses 1 et 2 nous indique que la pluie pollinique qui atteint le

marais d'Emaotfer est issue d'une végétation située à une altitude proche de notre site d'étude.

#### 1.4. Résultats de l'analyse des grains de pollen, des phytolithes et des grains d'amidon

L'étude de l'enregistrement de Tfer06 repose sur le diagramme synthétique des assemblages polliniques, les taxons de marécages ayant été retirés de la somme de base, en plus des spores et des grains de pollen indéterminés. Bien qu'étant des herbes au sens strict, *Peperomia* et *Musa* sont compris dans les AP. *Musa*, de part sa taille occupe le paysage de la même manière qu'une plante ligneuse, et les espèces de *Peperomia* étant des épiphytes au Vanuatu, leur présence est le reflet de l'existence d'autres arbres.

Afin de faciliter la lecture du diagramme d'Emaotfer et d'Otas, certains genres ayant la même écologie sont regroupés selon leur famille. Les diagrammes détaillés présentant la totalité des taxons (plus de 100 pour la carotte du marais d'Emaotfer) se trouvent aux Annexes 13A et 13B.

- Ainsi, les genres *Meryta* et *Schefflera* sont regroupés dans les Araliaceae ;
- les genres *Geissois* et *Weinmannia* dans les Cunoniaceae ;
- les genres *Aceratium* et *Elaeocarpus* dans les Elaeocarpaceae ;
- les genres *Acalypha*, *Claoxylon*, *Cleidion*, *Glochidion*, *Homalanthus* et *Macaranga* dans les Euphorbiaceae ;
- les genres *Derris*, *Desmodium*, *Inocarpus*, *Intsia* et *Pterocarpus* dans les Fabaceae ;
- les genres *Acacia*, *Adenantha*, *Entada*, *Parkia* et les grains de pollen indéterminés appartenant à la sous-famille des Mimosoidae dans le groupe Mimosoidae ;
- les genres *Ficus* et *Malaisia* dans les Moraceae ;
- les genres *Arytera*, *Cupaniopsis*, *Dodonaea*, *Elattostachys* et *Guia* dans les Sapindaceae ;
- les genres *Bruguiera* (assez rarement rencontré), *Ceriops* et *Rhizophora* dans les Rhizophoraceae ;
- et les genres *Dendrocnide* et *Pipturus* dans les Urticaceae.

Le genre *Pandanus*, se développant dans des habitats très variés comme sur le littoral dans la forêt marécageuse, est un taxon pollinique écologiquement peu significatif, comme d'autres genres tels que *Maesa*, *Garcinia* ou *Psychotria*.

Sur la base de l'observation du diagramme et de l'analyse cluster, 4 zones polliniques ont pu être définies (figure 4).

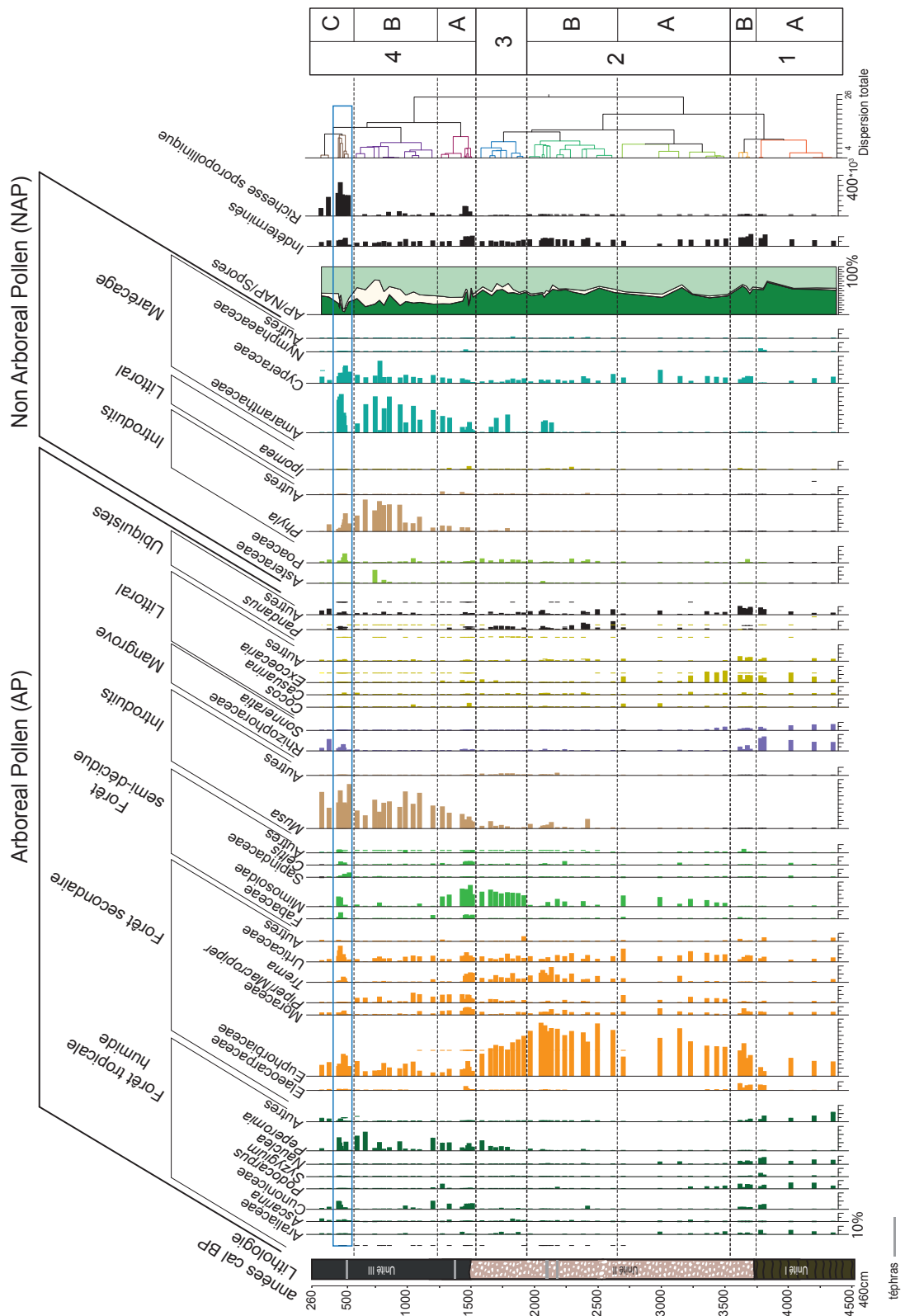


Figure 4 : Diagramme synthétique de la carotte Tfer06. Le rectangle bleu correspond à une zone extrêmement riche en grains de pollen de *Piper* et *Macropiper*. Dans cette zone, les deux taxons n'ont pas été pris en compte dans le calcul des pourcentages

La zone 1, à la base de la carotte, est divisée en deux sous-zones. La zone 1A est caractérisée par la présence d'une forêt tropicale humide diversifiée, composée majoritairement d'Araliaceae, *Podocarpus* et *Nauclea*, ainsi que de la mangrove. À l'exception des Euphorbiaceae, les taxons de végétation secondaire et ceux de la forêt semi-décidue, sont peu représentés. *Excoecaria*, que l'on trouve en arrière-mangrove mais aussi sur la plage, est le genre dominant de la flore du littoral. La zone 1B enregistre un recul de la mangrove – cette végétation finira par quasiment disparaître vers 3000 ans BP - et de la forêt tropicale humide à partir de 3700 ans BP, ainsi qu'un développement de la forêt secondaire, principalement les Euphorbiaceae et les Urticaceae. Les Moraceae progressent plus légèrement.

La base de la sous-zone 1B correspond au changement de faciès sédimentaire (de l'argile vers le gel). La zone 1, datée de 4400 à 3500 ans cal (âges calibrés) BP, est marquée par une modification importante du couvert végétal, la forêt dense humide laissant la place à une végétation plus clairsemée.

Cette succession de végétation est à rapprocher de conditions environnementales plus sèches. Le recul de la mangrove est plutôt à relier à une baisse du niveau de la mer. Pour cette forêt se développant dans la zone de balancement des marées, la présence d'eau salée à saumâtre est un facteur plus limitant qu'une modification des conditions climatiques.

La zone 2A, comprenant la période de 3500 à 2700 ans cal BP a livré le plus grand nombre d'échantillons stériles. Quelques taxons de la forêt tropicale humide sont conservés, comme les Aralicaeae et *Podocarpus*. La forêt secondaire reste abondante, notamment avec le développement de *Macropiper* et *Piper*, et les Mimosoidae, taxon de la forêt semi-décidue, augmentent. La végétation du littoral se diversifie, avec la progression de *Cocos* et de *Casuarina*. *Excoecaria* en revanche, décroît après 3200 ans cal BP. Le couvert arboré de la zone 2B est largement dominé par la forêt secondaire, composée majoritairement par les Euphorbiaceae et *Trema*, deux taxons pionniers qui figurent parmi les premiers végétaux à coloniser un milieu après un événement (naturel ou anthropique) détruisant la végétation et qui supportent des conditions environnementales instables (voir le chapitre Méthodologie). Alors que les Urticaceae, les Moraceae, *Macropiper* et *Piper*, des taxons aux exigences écologiques plus spécifiques (sol plus riche, conditions climatiques plus stables, plus d'ombre) et au développement plus lent que les plantes pionnières, restent stables ou régressent. La forêt secondaire

atteint son développement maximum en fin de zone, vers 2050 ans cal BP, alors qu'une réduction de la forêt semi-décidue est enregistrée. Les Poaceae sont plus fréquemment rencontrées et les premières traces de plantes introduites (*Musa*) sont observées vers 2400 ans BP. La progression de la forêt semi-décidue dans la zone 2A est caractéristique d'un climat relativement sec, cohérent avec l'assemblage palynologique de la zone 1 caractérisé par le recul de la forêt tropicale humide. Par la suite, l'essor des taxons pionniers dans la zone 2B témoigne de conditions environnementales perturbées, comme par une forte variabilité climatique ou l'impact des activités humaines, empêchant une végétation plus mature (forêt tropicale humide ou forêt semi-décidue) de totalement se développer. L'apparition des taxons introduits est révélée par l'analyse palynologique, mais l'étude des phytolithes et des grains d'amidon dans cette zone n'a pas donné de résultats satisfaisants. De plus, l'analyse sédimentologique a révélé un niveau d'eau extrêmement bas dans le marais entre 2550 et 2140 ans cal BP (Wirrmann et al., 2011a), témoignant d'un événement naturel plutôt qu'anthropique. Il est ainsi difficile de relier la présence de cette végétation dégradée à une activité humaine locale.

Bien que statistiquement proche de la zone 2B, la zone 3, datée de 1950 à 1570 ans cal BP, est caractérisée par un déclin des taxons pionniers *Trema* et des Euphorbiaceae. Les Mimosoidae, ainsi que les Araliaceae, *Ascarina* et *Peperomia* se développent. Les grains de pollen du genre *Celtis*, bien que présents en faible pourcentage dans le diagramme, sont observés plus régulièrement. La dynamique de végétation de cette courte période de temps illustre des conditions climatiques plus stables et plus humides.

La zone 4 constitue la seule période de l'enregistrement pollinique où les taxons arborés reculent, favorisant une expansion des herbacées et des fougères. Une augmentation des Cyperaceae ainsi que des Amaranthaceae, apparus vers la fin de la zone 2B et souvent observés en pollinies\*, marque quasiment toute la zone 4. Dans la zone 4A, les Fabaceae, Mimosoidae et *Celtis* se développent, et la forêt dense humide progresse, dominée par les Cunoniaceae et *Peperomia*. Les grains de pollen de *Musa* et *Phylla* sont relevés en plus grande quantité. Le plus fort pourcentage des taxons d'herbacées est atteinte dans la zone 4B, entre 1300 et 530 ans cal BP. Les Poaceae et les Asteraceae sont plus fréquemment observées. Les taxons introduits, principalement *Musa* et *Phylla*, remplacent toutes les autres formes de végétation naturelle. Seuls *Peperomia*, les Euphorbiaceae, *Piper*, *Macropier*, et les Urticaceae subsistent avec des pourcentages significatifs. Le genre *Musa* produit un fruit important, la banane, tandis

que *Phyla*, un genre aujourd'hui invasif, était utilisé à des fins médicales et ornementales (Smith, 1979). La majeure partie de la zone 4C est caractérisée par une surabondance (plus de 2000 grains/lame) des grains de pollen de *Piper* et de *Macropiper* (figure 4 et 5), associée à une forte présence de taxons introduits. De plus, des grains de pollen de *Piper methysticum*, plante utilisée dans la préparation du kava, une boisson rituelle du Vanuatu, ont pu être déterminés. Les Euphorbiaceae et les Urticaceae progressent à nouveau. Une végétation mixte, composée de taxons de la forêt semi-décidue (Fabaceae, Mimosoidae, Sapindaceae et *Celtis*) et de la forêt humide (*Ascarina*, Cunoniaceae, *Peperomia*), se développe dans cette zone.

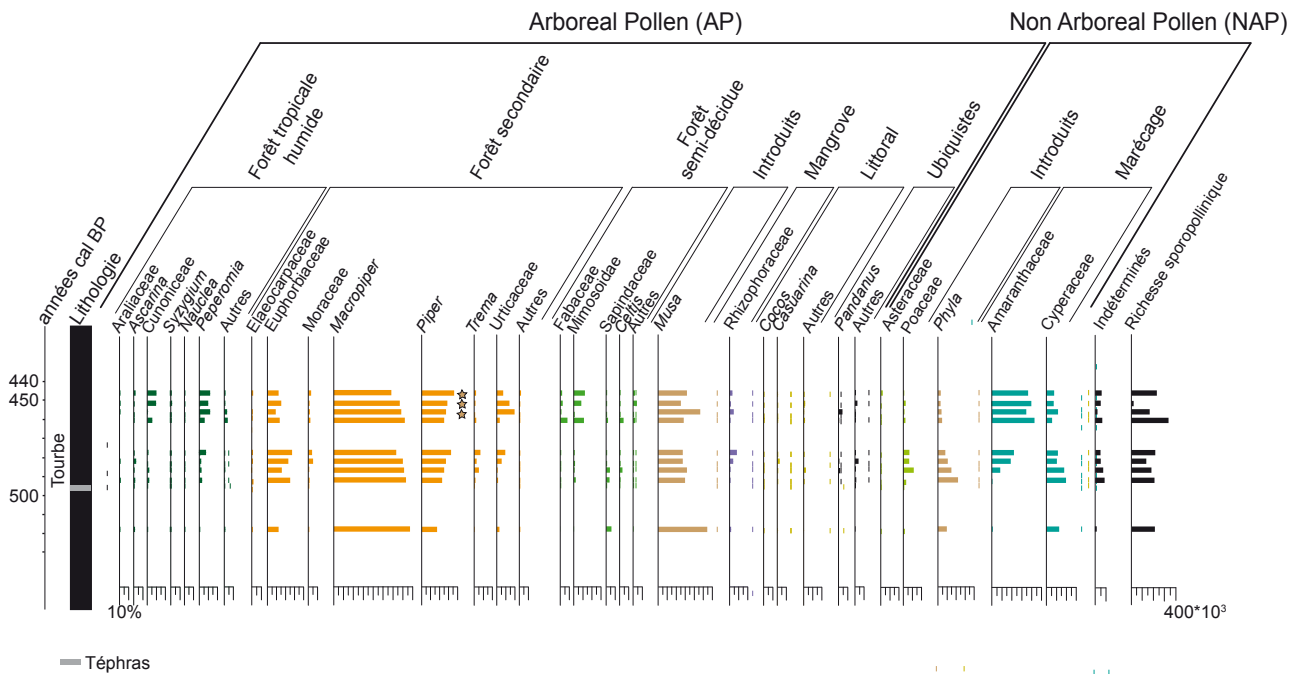


Figure 5 : Agrandissement du rectangle bleu de la figure 4. Les étoiles marquent la présence de l'espèce *Piper methysticum*

L'essor local des taxons de marécages est à relier au développement de la tourbe, vers 1500 ans cal BP : le comblement du lac permet à la végétation émergente d'envahir le site. Les taxons *Ascarina*, Cunoniaceae et *Peperomia* sont caractéristiques de la forêt de nuages, observée aujourd'hui à partir de 100 m d'altitude, et peuvent témoigner d'une baisse de température marquant la zone 4 par rapport à la zone 1, où ces taxons étaient peu représentés.



La présence de cette forêt humide et de taxons de la forêt semi-décidue témoigne de conditions environnementales naturelles humides, similaires à celles de la zone 3. L'impact des activités humaines, faible dans la zone 4A, devient important par la suite et fini par dominer la dynamique de végétation naturelle. Des phytolithes de *Musa* ont été retrouvés dans des échantillons de la zone 4B et 4C, indiquant un espace cultivé proche du marais d'Emaotfer. Au Vanuatu, les espèces de *Piper* et de *Macropiper* peuvent être utiles à l'Homme, en remplacement du kava ou en médecine (C. Sam, pers. communication). L'apparition et la disparition brutale de la surabondance en *Piper* et *Macropiper* ainsi que la présence de *P. methysticum* soutiennent l'hypothèse qu'une telle abondance serait, au moins en partie, d'origine anthropique. Le retour à une végétation plus naturelle est noté vers la fin de l'enregistrement.

Des niveaux de téphras sont observés tout au long de la carotte, mais ne semblent pas correspondre à des changements de la végétation. Seul le niveau de téphras le plus récent, dans la zone 4C, daté de 498 BP (1452 AD), est suivi par une réduction des taxons arborés (figure 4), puis par une petite progression des Poaceae, de la forêt semi-décidue et de la forêt secondaire (figure 5). Cependant, il reste difficile de définir la part des activités humaines de celle de l'éruption sur ce changement de dynamique de végétation.

### 1.5. Résultats de l'analyse des micro-charbons

Les résultats issus des comptages des micro-charbons sur les lames palynologiques (<160 µm) et sur les refus de tamis (>160 µm) sont représentés dans la figure 6.

Jusqu'à 1800 ans cal BP, très peu de charbons sont comptés, seul un pic de la surface moyenne, indiquant des particules de plus grande taille, est à noter vers 2170 ans cal BP. Le rapport W/L (plus grande largeur/plus grande longueur) oscille entre 0,4 et 0,6, sauf vers 2170 ans cal BP, où il est de 0,2. Après cette date, nous observons plusieurs points de la courbe W/L compris entre 0,1 et 0,3, mais ces échantillons étant très peu riches en charbons, nous ne pouvons pas les considérer comme représentatifs du signal incendie. Les résultats de cette période illustrent une faible présence des feux, et, selon le rapport W/L, la biomasse brûlée est constituée d'arbres comme d'herbes (figure 6). Cependant, à partir de 3700 ans cal BP, l'analyse palynologique révèle des conditions

environnementales plus sèches (figure 4), pouvant favoriser le déclenchement de feux. Les charbons retrouvés dans les échantillons indiquent l'existence d'incendies avant 1800 ans cal BP, mais ceux-ci n'étaient sans doute pas d'assez grande ampleur, ou assez proches du marais d'Emaotfer pour qu'une importante quantité de particules carbonisées puissent s'y déposer. De plus, la végétation autour du marécage empêchant les plus grands charbons d'atteindre le site, la relative petite taille des particules témoigne de leur transport. La compilation des données palynologiques provenant des îles de l'Océanie Lointaine démontre que les feux font office d'exception avant l'arrivée de l'Homme (Spriggs, 2010, for a review). À 2170 ans cal BP, la courbe W/L signale un incendie dont la biomasse est composée en majorité d'herbes et le pic de la surface moyenne associé marque un événement local, très proche, voire au niveau du marais. Cet épisode de feu étant précédé par une couche de téphras, nous pouvons supposer que le dépôt d'éjectas volcaniques a amplifié l'assèchement de la végétation, déjà généré par les conditions environnementales relativement sèches (zone 2B - figure 4), favorisant le déclenchement d'un feu local.

À partir de 1800 ans cal BP et jusqu'à la fin de la carotte, le rapport W/L est inférieur à 0,5, la biomasse brûlée est donc principalement composée d'herbacées. Entre 1800 et 1500 ans cal BP, la concentration en charbons de taille supérieure à 160  $\mu\text{m}$  augmente légèrement, mais à l'exception de deux échantillons, les particules restent de petite taille. Les processus sédimentaires ne variant pas au cours de cette période, des modifications du signal incendie peuvent être reliées à une augmentation de la biomasse, qui peut être associée au climat plus humide observé dans le diagramme palynologique (zone 3 - figure 4).

Autour de 1500 ans cal BP, un premier pic de concentration en charbons est observé pour les particules comptées sur les lames palynologiques comme sur les refus de tamis, et coïncide avec le développement de la tourbe. La concentration maximum en charbons de taille supérieure à 160  $\mu\text{m}$  est atteinte vers 1100 ans BP, et persiste jusqu'à 950 ans BP. Un pic semblable est aussi noté pour les charbons plus petits, mais celui-ci est daté entre 1000 et 700 ans cal BP. Enfin, une nouvelle augmentation de la concentration en charbons de taille supérieure à 160  $\mu\text{m}$  se produit à une période très récente. La courbe de la surface moyenne reste stable, seule une petite hausse est notée au niveau de la transition gel-tourbe.

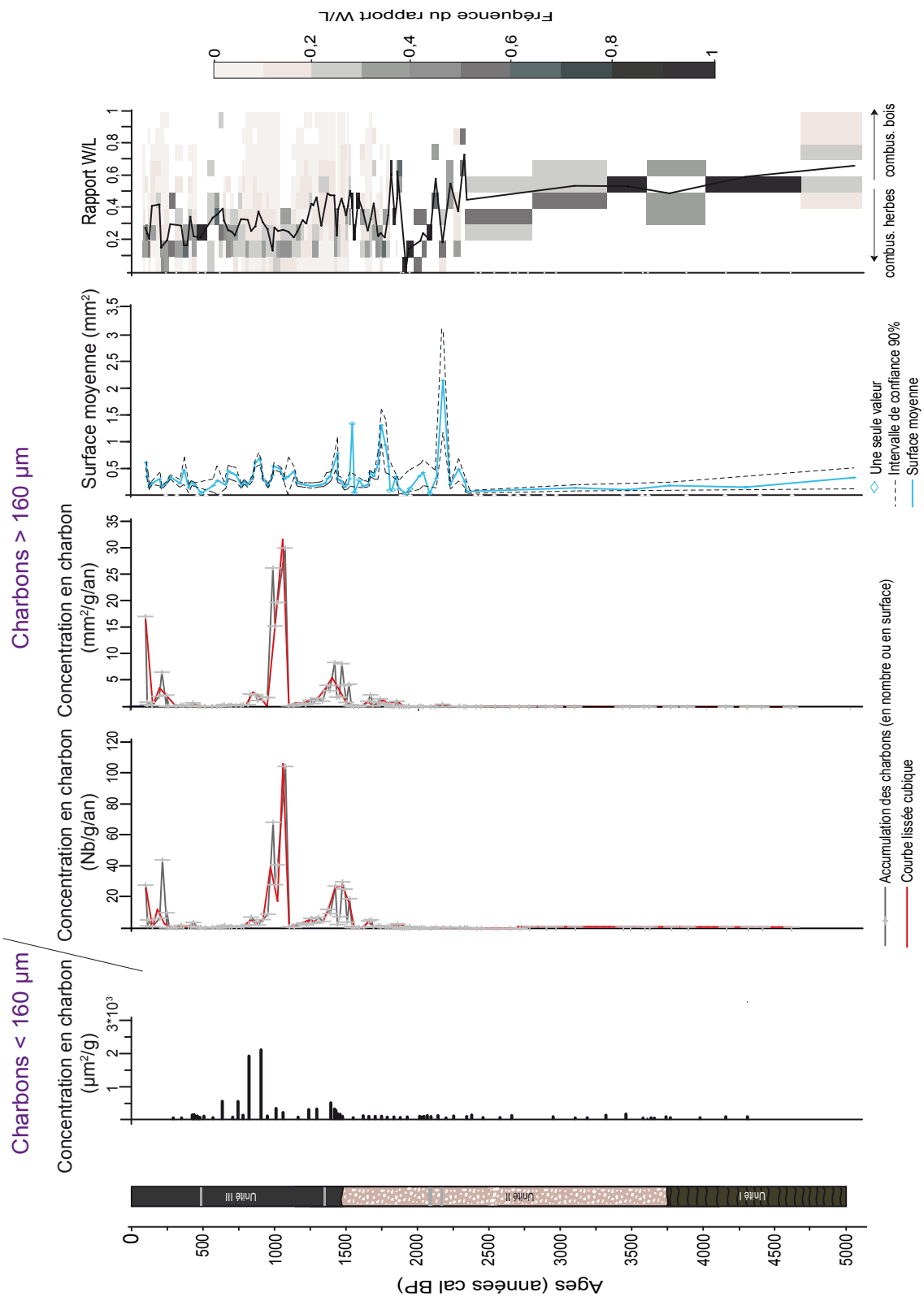


Figure 6 : Courbes de la concentration en charbons (particules > et < à 160  $\mu\text{m}$ ), de la surface moyenne et du rapport W/L pour les particules > 160  $\mu\text{m}$

Au cours des 1500 dernières années, la dynamique des feux se complexifie : la tourbe, en comblant une partie du marécage, permet à la végétation émergente de se développer, et localement, la biomasse végétale augmente. Une intensification des incendies, enregistrée par les échantillons localisés à la transition gel-tourbe, vers 1500 ans cal BP, peut être reliée à la plus grande quantité de combustible disponible, mais aussi aux activités humaines. Le genre *Musa* commence en effet à se développer vers 1500 ans BP (zone 4A - figure 4), et des défrichements à l'aide des feux peuvent être nécessaires à la mise en place de ce type de culture.

Le pic de charbons daté entre 1100 et 950 ans cal BP est contemporain du développement maximum des taxons introduits et de la présence de phytolithes de *Musa* (zone 4B - figure 4). La majorité des particules observées dans ces échantillons sont extrêmement fines (figure 7), donc fragiles, indiquant une origine proche du marais. Le rapport W/L constamment en dessous de 0,5 atteste de l'importante proportion d'herbacées composant la biomasse brûlée. Une combinaison d'évènements naturels et d'activités humaines peut expliquer la forte hausse des incendies à cette période : la biomasse végétale est favorisée par des conditions environnementales plus humides depuis 1800 ans BP, et l'accumulation de ce combustible facilite le déclenchement de feux nécessaires aux défrichements. Le pic de concentration en charbons de taille inférieure à 160 µm se produit environ 100 ans après celui des plus grands charbons. Les particules de plus petite taille reflètent l'existence d'incendies à



Figure 7 : Photos de charbons > 160 µm, prélevés à 97,5, 101,5 et 106,5 cm de profondeur

une plus grande échelle spatiale, mais le décalage dans les pics peut aussi être expliqué par une fragmentation et un remaniement des grands charbons dans des sédiments plus récents. Ces deux pics illustreraient donc les mêmes évènements.

Par la suite, la concentration en charbons diminue et reste faible jusqu'à des périodes très récentes où elle augmente à nouveau. Le signal incendie, sans relation avec un changement de sédimentation, pourrait correspondre à l'influence de l'arrivée des européens.

## 2. La carotte Ota2

### 2.1. Lithologie de la carotte et choix des échantillons

La carotte Ota2 a été prélevée dans le lac Otas sur la pointe est d'Efate (voir le point 1.1. du chapitre Cadre de l'étude). Couvrant environ le dernier millénaire, elle se compose d'une alternance de niveaux organiques entrecoupés de niveaux sableux riches en coquilles et en coraux. Il n'y a pas de taux de sédimentation propre à un faciès, certains se déposant très rapidement, lors d'un cyclone par exemple, d'autres plus lentement. Les analyses sédimentologiques, de microfaune et de microflore informent de la présence d'une lagune qui se serait fermé par le comblement d'une bande de terre il y a environ 600 ans cal BP, formant le lac Otas (figure 8 et voir le point 1.2.1. du chapitre Interprétations et discussions pour plus de détail). Cependant, le site aurait été envahi par la mer à plusieurs reprises jusque dans les périodes récentes, vers 300 ans cal BP. Les dépôts organiques proviendraient plutôt de matière végétale et animale, amenée dans le lac grâce au ruissellement.

Les analyses palynologiques n'ont été réalisées que dans les niveaux organiques, les seuls propices à la conservation de tels marqueurs. Ainsi, sur 18 échantillons analysés, 15 ont été suffisamment riches en pollen pour obtenir des résultats statistiquement fiables. Les charbons étant faiblement préservés dans la carotte, l'analyse des particules de taille supérieure à 160  $\mu\text{m}$  n'a pas été possible. Le comptage des micro-charbons s'est donc effectué en même temps que la détermination des grains de pollen, mais la discontinuité de l'enregistrement nous permet uniquement de déterminer l'absence ou la présence de feux (voir le point 3.5. du chapitre Méthodologie).

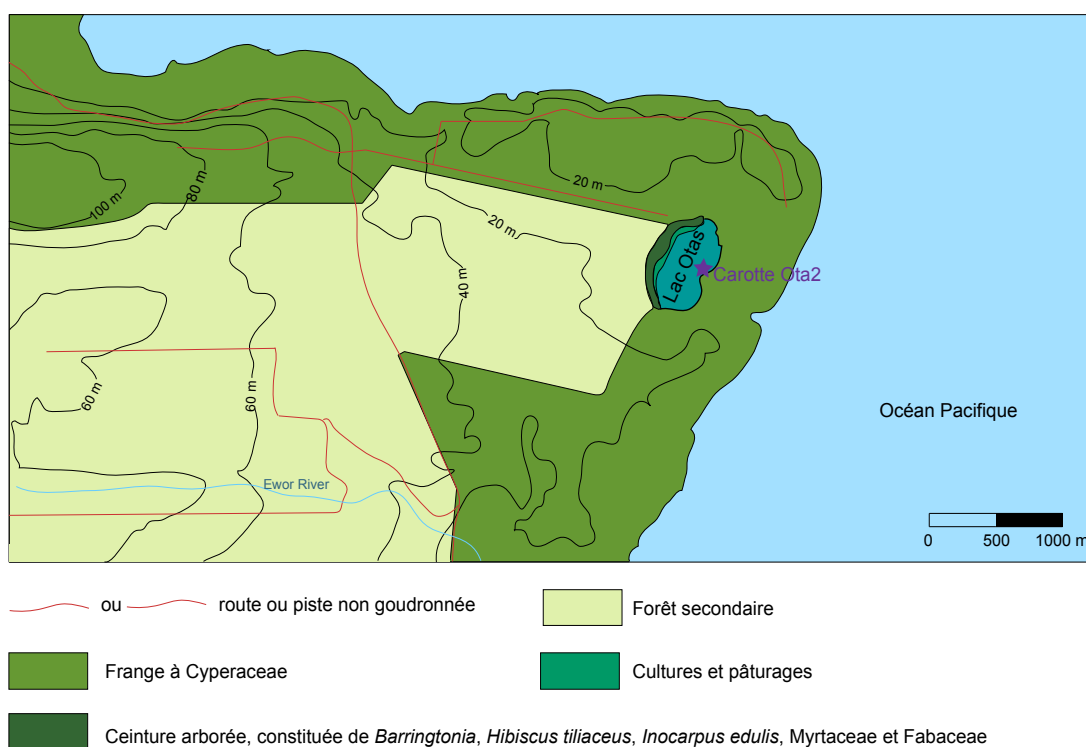


Figure 8 : Localisation de la carotte Ota2 et de la végétation autour du site, d'après Siméoni, 2009, for a review

## 2.2. Modèle d'âge-profondeur de la carotte Ota2

Les âges radiocarbone de 12 échantillons ont été obtenus sur la carotte Ota2, et 10 d'entre eux ont été pris en compte dans la réalisation du modèle d'âge-profondeur (tableau 2 et figure 9).

La réalisation de la courbe âge-profondeur a été plus difficile que pour la carotte Tfer06. Prendre en compte, dans le modèle, l'échantillon situé à 174,5 cm de profondeur, alors qu'il n'est pas tout à fait chronologiquement cohérent avec les autres, ou extrapoler la courbe sans cette dernière date change l'âge de la base de la carotte de 600 ans. Ainsi, l'analyse statistique, déterminant deux valeurs comme aberrantes, et la forte incohérence temporelle de l'échantillon situé à 61,5 cm de profondeur nous permet de justifier la mise à l'écart des dates  $1005 \pm 30$  et  $925 \pm 30$  ans  $^{14}\text{C}$ . Trois périodes distinctes sont identifiables grâce à ce modèle (figure 9) : le haut de la carotte, daté autour de 300 ans cal BP, une zone comprise entre 50 et 100 cm de profondeur datée de

600 ans cal BP, puis, entre 100 et 130 cm de profondeur, une période datée de 800 à 1000 ans cal BP où le sédiment s'est déposé de manière continue.

Le taux de sédimentation étant irrégulier, il nous est en revanche impossible d'utiliser le modèle d'âge-profondeur afin de dater la base de la carotte, à 175 cm de profondeur.

| Profondeur (cm) | Matériel daté  | <sup>13</sup> C (‰) | Âge <sup>14</sup> C conventionnel | Âge années cal BP |
|-----------------|----------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 0,5             | Écorce de bois | -20.5               | 305±30                            | 156-448           |
| 48,5            | Bois           | -27.9               | 655±30                            | 549-650           |
| 48,5            | Sédiment       | -29.7               | 685±30                            | 557-658           |
| 61,5            | Sédiment       | -16.4               | 1005±30                           | 798-927*          |
| 65,5            | Sédiment       | -34.0               | 695±30                            | 558-663           |
| 67,5            | Bois           | -24.7               | 635±30                            | 536-649           |
| 85,5            | Bois           | -29.3               | 645±30                            | 544-649           |
| 86,5            | Sédiment       | -26.2               | 600±30                            | 519-631           |
| 115,5           | Charbon        | -30.0               | 895±30                            | 684-878           |
| 123,5           | Bois           | -23.9               | 990±30                            | 790-925           |
| 132,5           | Charbon        | -23.9               | 1085±30                           | 906-1054          |
| 174,5           | Sédiment       | -29.7               | 925±30                            | 726-905*          |

Tableau 2 : Âges radiocarbone obtenus sur la carotte Ota2 et calibrés selon Oxcal 4.2.2. et la courbe ShCal13. Les astérisques indiquent les échantillons qui ne sont pas pris en compte dans le modèle d'âge-profondeur

### 2.3. Résultats de l'analyse des grains de pollen et des micro-charbons

L'étude de l'enregistrement de Ota2 repose sur le diagramme synthétique des assemblages polliniques, les taxons du littoral, extrêmement dominants dans tous les échantillons, ont été retirés de la somme de base, en plus des taxons de marécages, des spores et des grains de pollen indéterminés. Le diagramme détaillé qui se trouve en Annexe 13B comprend les taxons du littoral dans la somme de base.

En s'appuyant sur l'observation du diagramme et sur l'analyse cluster, 3 zones polliniques ont pu être définies (figure 10).

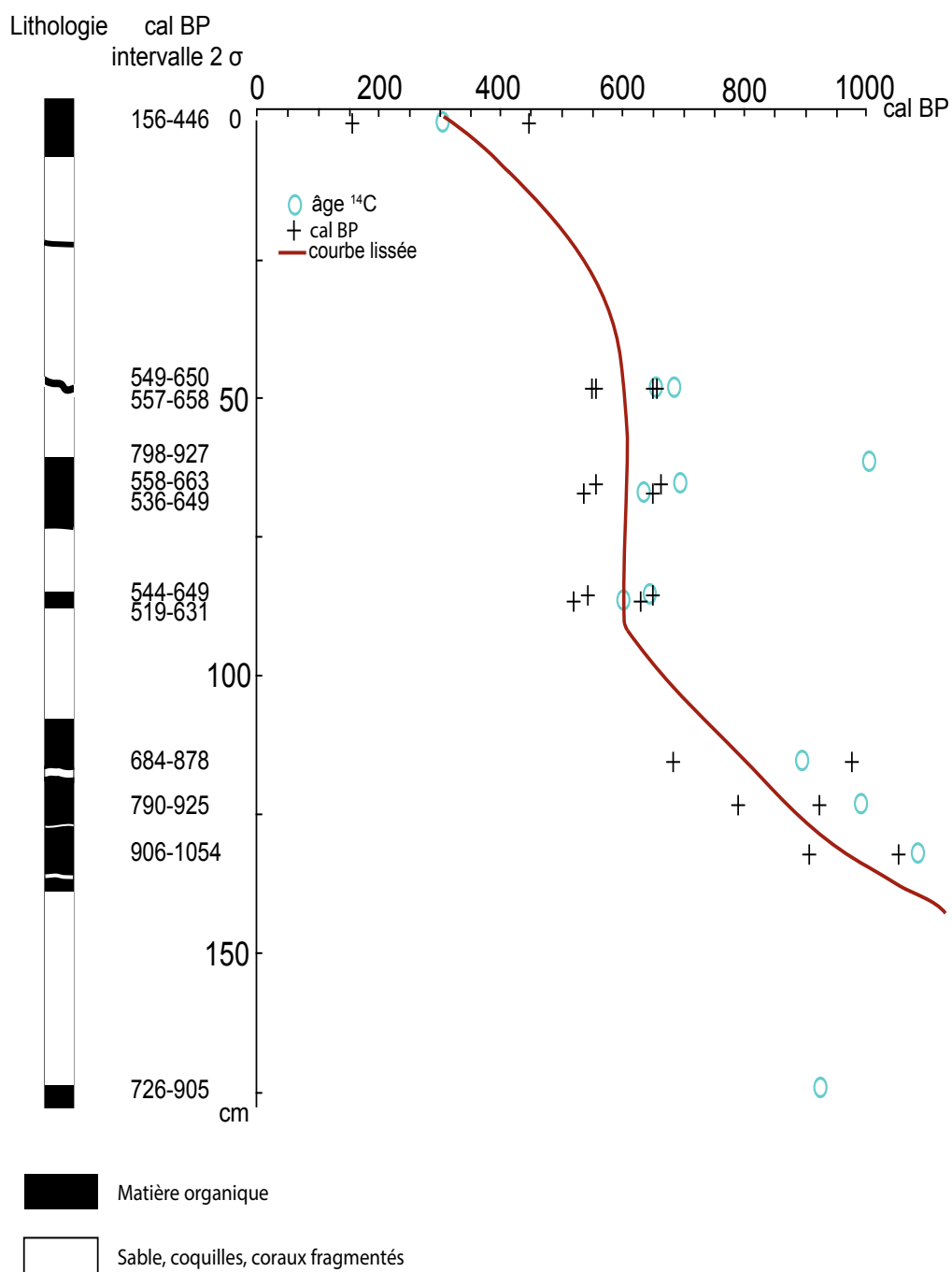


Figure 9 : Lithologie et modèle d'âge profondeur de la carotte Ota2. Les dates calibrées (sauf celles avec les astérisques dans le tableau 2) sont ajustées par une courbe lissée polynomiale afin de réaliser le modèle



La zone 1, comprenant la base de la carotte et datée jusqu'à 1000 ans cal BP, illustre un fort pourcentage de taxons de la forêt secondaire, les Euphorbiaceae (*Acalypha*, *Homalanthus* et *Macaranga*) étant la famille dominante, les Urticaceae, *Trema*, les Moraceae et les Malpighiaceae étant présent en plus faible pourcentage. Cette végétation décline dans le dernier échantillon de la zone 1, remplacée par une forêt mixte, composée de taxons de la forêt semi-décidue (*Derris*, *Inocarpus*, *Intsia* et *Pterocarpus* dans le groupe des Fabaceae et *Acacia*) et de la forêt tropicale humide (*Veitchia*, *Ascarina* et *Symplocos*). La fermeture du milieu, marquée par l'essor des arbres, aux dépens des arbustes et des buissons, témoigne de conditions environnementales plus humides. Il est important de noter qu'une flore comme celle de la forêt tropicale humide ou celle de la forêt semi-décidue se développe lentement : une cinquantaine, voire une centaine d'années sont nécessaires pour qu'une végétation composée de taxons pionniers soit remplacée par une végétation plus mature (Chave, 1999 ; Lebrija-Trejos et al., 2010). Nous pouvons ainsi dater relativement la base de la carotte : le niveau sableux compris entre les échantillons situés à base de la carotte et celui daté à 1000 ans cal BP (à la fin de la zone 1), s'est déposé pendant une période relativement longue, vraisemblablement une centaine d'années.

La zone 2A, datée de 960 à 850 ans cal BP est composée en majorité d'échantillons stériles, seulement 2 ont présenté des résultats significatifs. Le genre *Acacia* continue de progresser, tandis que la forêt humide recule, et n'est plus composée que de Cunoniaceae et *Veitchia*. La végétation secondaire se diversifie, avec le développement des Moraceae, des Urticaceae, de *Macropiper* et de *Piper*. Dans la zone 2B, la forêt secondaire s'accroît et domine le paysage, tandis que *Acacia* régresse. La forêt tropicale humide, toujours faiblement représentée, est composée d'Araliaceae, Cunoniaceae, *Veitchia* et *Symplocos*. La concentration en charbons, en hausse depuis la zone 1, atteint son maximum dans la zone 2A. L'enregistrement illustre à cette période des conditions environnementales plus perturbées et plus sèches dans la zone 2A, qui deviennent plus humides dans la zone 2B. Un changement environnemental ou un événement plus ponctuel, comme un cyclone, peut être à l'origine de la modification de la flore. La composition de la végétation, relativement similaire tout au long de la zone 2B (250 ans) favorise l'hypothèse d'une perturbation de longue durée. Le pic de feux témoigne d'un milieu plus sec.

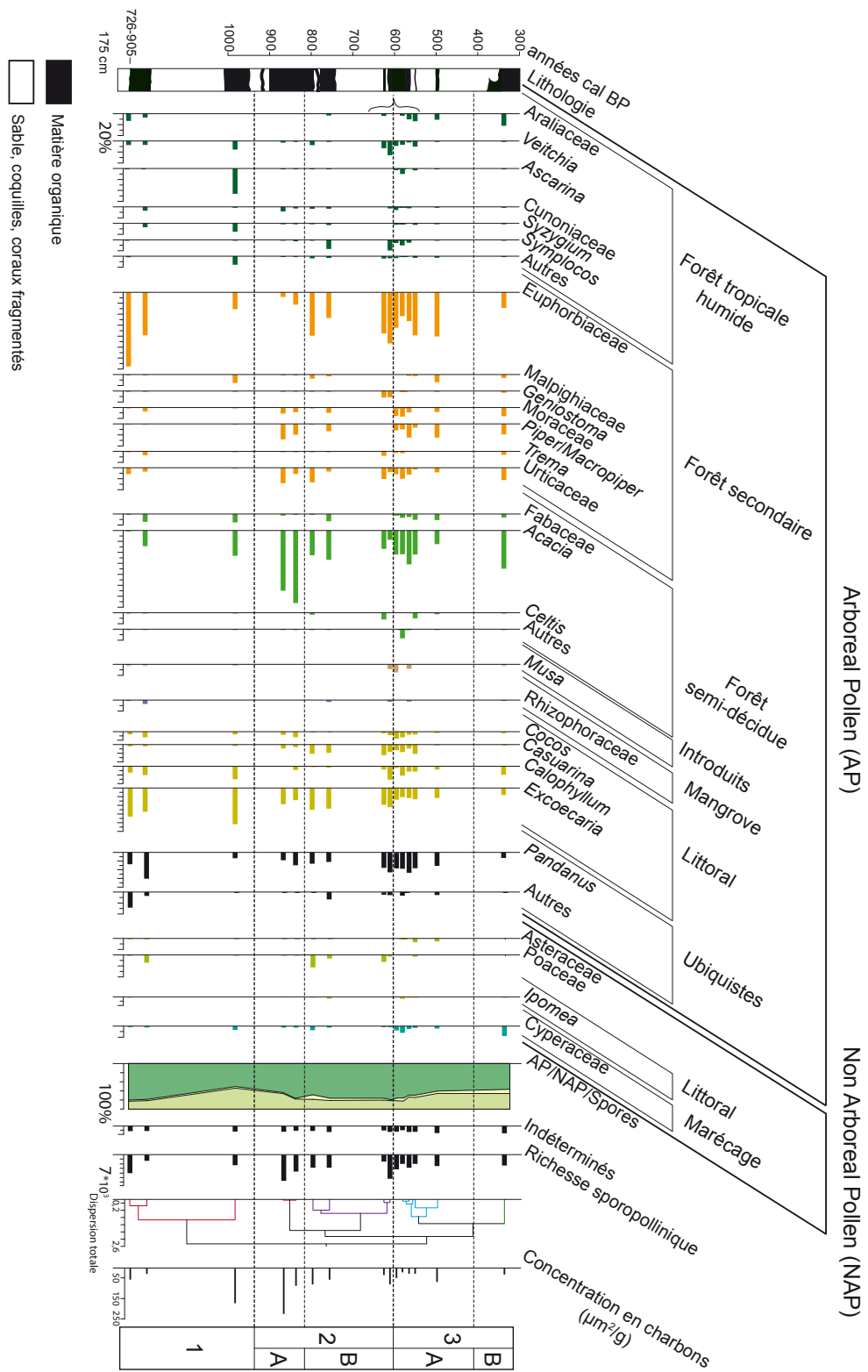


Figure 10 : Diagramme synthétique de la carotte Ota2, comprenant les grains de pollen et les micro-charbons de taille inférieure à 160 µm. L'accolade regroupe tous les échantillons datés d'après le modèle d'âge-profondeur à 600 ans cal BP

La zone 3A correspond aux échantillons datés de 600 ans cal BP, à l'exception des deux plus profonds (figure 9), et à l'échantillon daté de 500 ans cal BP. La forêt tropicale humide et la forêt semi-décidue, respectivement dominées par les Araliaceae, *Veitchia*, et *Symplocos* et par les Fabaceae, *Acacia* et *Celtis*, se diversifient ; les Cyperaceae sont plus fréquemment observées. La forêt secondaire reste cependant importante. La zone 3B est surtout marquée par la régression des taxons du littoral. Cette période est caractérisée par des conditions environnementales plus humides, mais la forte présence de la forêt secondaire, principalement composée d'Euphorbiaceae, Malpighiaceae, Moraceae, *Piper*, *Macropiper* et Urticaceae, témoigne d'une perturbation affectant le milieu. L'alternance de niveaux sableux et organiques, tous datés à 600 ans cal BP d'après le modèle d'âge, signale des phases de dépôt rapides, témoin de montées et baisses du niveau de la mer brusques que l'on pourrait apparenter à des événements cycloniques, cohérents avec un climat plus humide. La progression des Cyperaceae et le recul des taxons du littoral montrent un éloignement de la mer, en lien avec la fermeture de la lagune enregistrée par la microfaune et de la microflore du site. L'accumulation de sédiments pourrait être à l'origine de cette fermeture.

Enfin, le très petit pourcentage de taxons introduits à la fin de la zone 2 et au début de la zone 3A, et l'absence de ces taxons dans tous les autres échantillons révèlent un impact anthropique faible voire inexistant autour du lac Otas. La côte des îles de l'archipel du Vanuatu est très exposée aux alizés (Cillauren et al., 2002 ; Siméoni, 2009, for a review). Les inondations régulières du site par la mer et l'exposition aux alizés ne favorise pas une installation à long terme et explique la faible influence de l'Homme sur l'environnement autour du lac.





## Interprétations et discussions

### 1. Spécificités des paléoenvironnements d'Emaotfer et d'Otas

#### 1.1. Particularités du paléoenvironnement du marais d'Emaotfer

##### 1.1.1. Données sédimentologiques

Le marais d'Emaotfer constitue une petite dépression, formée dans une doline au début de l'Holocène. Il est alimenté en eau par les pluies et par le ruissellement le long des pentes menant à la dépression (Sémah et Wirrmann, 2006). Le modèle d'âge et les analyses sédimentologiques (point 1.1. et 1.2. du chapitre Résultats) indiquent un dépôt régulier du sédiment, sans trace de remaniement.

Le site archéologique du cimetière de Teouma est constitué de coraux roulés (Bedford et al., 2006), témoignant de la proximité de la côte il y a 3000 ans BP. À cette période, le niveau élevé de la mer devait influencer la hauteur des nappes phréatiques, situées près du marais d'Emaotfer et du cimetière. Le recul de l'océan a probablement engendré une baisse du niveau de ces nappes, marquant, à court terme, la composition de la végétation localisée autour du marécage.

##### 1.1.2. Données palynologiques et de micro-faune

L'observation du diagramme pollinique détaillé (Annexe13A) révèle une très forte diversité végétale, témoin de la multitude d'espèces présentes sous les tropiques. Ainsi, 141 taxons ont pu être identifiés, le plus souvent jusqu'au genre, et parfois seulement à la famille dans le cas des herbacées, ou lorsque la détermination s'avérait problématique (grain de pollen abimé, genre inconnu).

D'après les résultats de l'étude palynologique des mousses, nous avons aussi pu noter la distance relativement faible parcourue par le matériel sporopollonique qui atteint le marais (point 1.3. du chapitre Résultats). Notre enregistrement concerne donc une végétation plutôt locale. La carotte Tfer06 est en majorité dominée par les taxons de la forêt secondaire, et plus particulièrement, par les Euphorbiaceae. Mais, nous avons pu constater, grâce à l'analyse des mousses, que le genre *Macaranga*, inclus dans le groupe des Euphorbiaceae, est sur-représenté dans les données polliniques. Bien que les

variations des Euphorbiaceae observées dans le diagramme sont probablement représentatives de celles survenant dans l'environnement holocène, la proportion de *Macaranga* dans la paléovégétation était sans doute moins importante que celle présentée dans la diagramme.

Le recul de la mangrove, qui accompagne la baisse du niveau de la mer, est suivi par une régression de la végétation du littoral. Cependant, alors que la mangrove est quasiment absente de la carotte Tfer06 après 3000 ans cal BP, la végétation côtière est toujours enregistrée dans le diagramme pollinique. Nous pouvons en déduire que les conditions environnementales après 3000 ans cal BP ne sont plus favorables au développement de la mangrove (changement de la géomorphologie des côtes, par exemple).

La proportion de taxons introduits est particulièrement conséquente à partir de 1300 ans cal BP, les informations concernant la végétation naturelle du dernier millénaire sont donc restreintes pour Emaotfer (voir point 2.2. pour plus de détail).

Les analyses palynologiques et de microfaune ont souligné l'existence, tout au long de la carotte Tfer06, de l'ostracode *Gomphodella sp.*, et des taxons de marécages, (principalement les Cyperaceae et les Amaranthaceae), illustrant la présence permanente d'eau dans le marais (Wirrmann et al., 2011a). Ce site a donc constitué une zone refuge pour la végétation lors de périodes de sécheresse.

Un essor important des Amaranthaceae, ainsi que le remplacement de diatomées de milieu à forte conductivité par des espèces acidophiles, sont observés au moment du développement de la tourbe. Ces événements pourraient correspondre à une succession hydrosérale : les plantes aquatiques prolifèrent, diminuent le débit d'eau, piègent les sédiments et contribuent à l'invasion par la végétation émergente, telle que les Amaranthaceae et les Cyperaceae. Le niveau de l'eau continue à baisser avec l'accumulation de tourbe, constituée de débris de cette végétation. La progression notable des Amaranthaceae, souvent trouvés en pollinies, illustre la proximité des taxons de marécages du site de prélèvement de la carotte, et indique une baisse du niveau de l'eau, cohérent avec le développement de la tourbe. La présence de diatomées acidophiles peut être reliée à l'augmentation de composés humiques, due à une forte décomposition de la végétation.

### 1.1.3. Analyses statistiques ACP

L'analyse en composantes principales a été appliquée à toutes les zones polliniques non stériles. Les figures 1 et 2 illustrent la distribution des taxons et des spectres polliniques sur le plan factoriel formé par les 2 premiers axes (biplot – voir le point 3.6.3. du chapitre Méthodologie). La matrice de calcul de l'ACP est composée de 28 variables, correspondant aux taxons définis dans le diagramme pollinique d'Emaotfer (point 1.4. du chapitre Résultats). Ce sont des genres et des familles bien représentés tout au long de la séquence.

L'observation des signaux statistiques sur le biplot (figure 1) permet de déterminer les deux facteurs influençant principalement la distribution des taxons. L'axe vertical reflète les conditions d'humidité (milieu sec/humide) et l'axe horizontal l'ouverture du paysage, ainsi que l'impact anthropique (milieu ouvert - dégradé par l'Homme/milieu fermé - végétation naturelle).

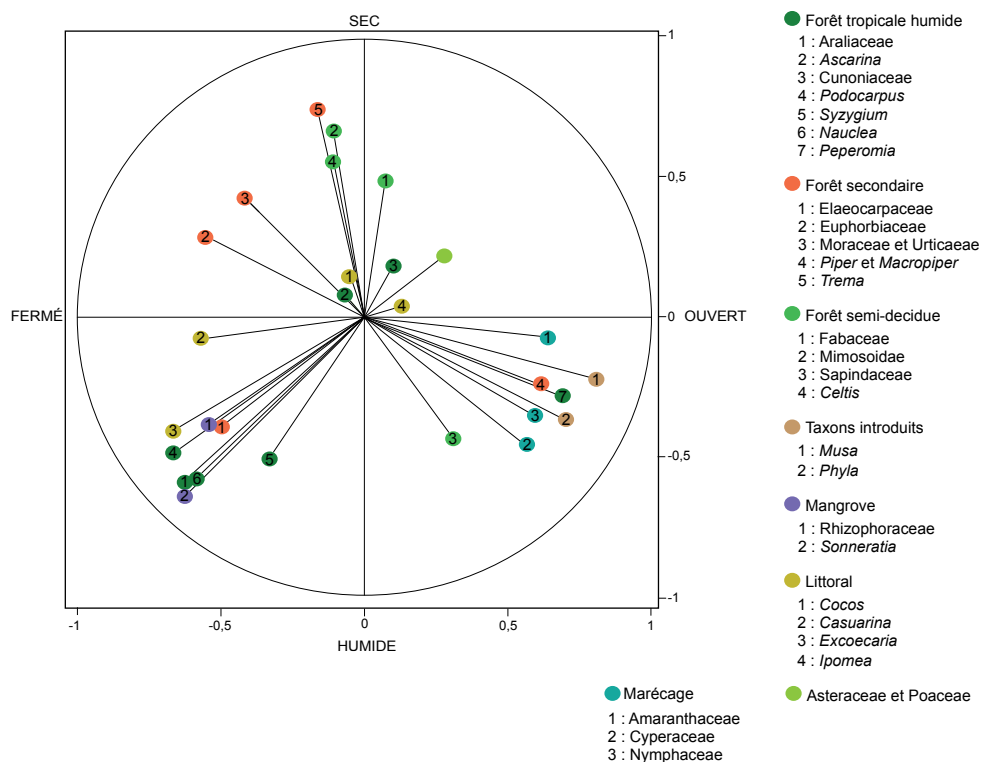


Figure 1 : Biplot des données polliniques. Les couleurs repèrent les associations végétales définies dans le diagramme pollinique d'Emaotfer



Les taxons de la forêt tropicale humide et de la mangrove sont en majorité regroupés dans la zone du biplot correspondant à des conditions environnementales humides et à un milieu fermé (valeurs négatives). Ces deux types de végétation régressent en effet à la même période (3700 ans cal BP), mais les causes de ces variations sont sans doute différentes : le développement de la mangrove est lié majoritairement à la présence d'eau salée, et le recul de la mer occasionne le déclin de cet écosystème ; en revanche, la progression de la forêt tropicale humide est limitée par les conditions de précipitations.

Nous pouvons noter la position surprenante de certains taxons, comme la présence d'*Ascarina*, des Cunoniaceae et de *Peperomia* dans les valeurs positives (milieu sec et ouvert) ou des Elaeocarpaceae, *Piper* et *Macropiper* dans les valeurs négatives (milieu humide). Nous pouvons interpréter ces positions : le développement d'*Ascarina*, *Peperomia* et des Cunoniaceae se produit à la période où l'essor des taxons introduits est le plus important. Une zone refuge pour la forêt tropicale humide était donc localisée probablement au niveau du marais d'Emaotfer. La forêt secondaire regroupe un ensemble de plantes héliophiles, peu exigeante en humidité, et qui dominent le paysage tant que les conditions environnementales (instables) ne permettent pas le développement d'une végétation plus mature. Cependant, les besoins écologiques peuvent varier selon les taxons : les espèces pionnières, premières à recoloniser une zone où la flore initiale est dégradée, s'adaptent à tous types de milieux (climat sec ou humide, sol instable par exemple) ; les arbres et arbustes qui émergent après la mise en place de ces plantes pionnières sont plus sensibles aux conditions climatiques (Wheatley, 1992). Ainsi, les Elaeocarpaceae, *Piper* et *Macropiper*, caractéristiques de la forêt secondaire, ne sont pas des plantes pionnières, et sont un peu plus exigeants en humidité.

Les taxons du littoral sont graphiquement dispersés, leur essor n'étant pas dépendants des conditions climatiques ou de l'ouverture du paysage, mais de la proximité de la côte. De même, le comblement du marécage par la tourbe a permis le développement de la végétation émergente, comme les Amaranthaceae et les Cyperaceae. Leur présence est souvent reliée à la présence de l'humidité locale, mais elles sont ici associées à une baisse du niveau d'eau dans le marais.

La multitude d'axes issue de l'ACP est présentée dans des tableaux de corrélations variables (taxons)-facteurs (axes) en Annexe 8A. Plusieurs calculs ont été effectués, soit

en prenant en compte tous les taxons, soit en excluant les plus variables, afin de déterminer l'influence de l'ensemble des facteurs sur la distribution de la végétation.

Une majorité d'axes oppose des genres ou des familles de la forêt tropicale humide à des plantes de la forêt semi-décidue, ou de la forêt secondaire. Les conditions d'humidité constituent donc le principal facteur de modification de la flore à Emaotfer, une circonstance courante sous les tropiques (Quantin, 1972-1977 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Siméoni, 2009 for a review). Le deuxième type d'axe le plus fréquemment rencontré oppose un taxon introduit, le plus souvent *Phyllanthus*, avec un genre de la forêt semi-décidue (Fabaceae ou Mimosoidae). *Phyllanthus* étant une plante invasive, son développement se réalise au détriment de la végétation naturelle qui se trouve à cette période : une forêt mixte, composée à la fois de taxons de la forêt semi-décidue et de la forêt tropicale humide. Une forte anticorrélation est notée entre *Peperomia*/les Cunoniaceae et les autres taxons de la forêt tropicale humide, séparant la flore de la zone refuge de celle progressant sur un plus grand espace. Il s'agit du troisième type d'axe le plus fréquemment observé. Celui caractéristique de l'ouverture naturelle du paysage (qui dissocie les Asteraceae/Poaceae des arbres) est en revanche moins marqué.

La dispersion des spectres polliniques (figure 2) sur les deux axes ouvert-fermé et sec-humide fournit des informations intéressantes : cela permet de voir si les zones définies par l'analyse cluster s'individualisent aussi par l'ACP. L'analyse du graphique montre effectivement une distinction nette entre les zones 1A, 1B, 2 (mais pas entre 2A et 2B), 4A, 4B, 4C (sauf pour les points 1 et 2).

La zone 1A, représentée par les points 68 à 64, se positionne dans les valeurs négatives des deux axes, illustrant des conditions environnementales humides et une végétation dense. Ces résultats sont cohérents avec ceux du diagramme pollinique. La zone 1B, comprenant les points 63 à 59, est placée plus près de la ligne ouvert-fermé, mais demeure toujours dans les valeurs négatives des deux axes. Cette position indique une transition vers un milieu plus sec.

La zone 2A, caractérisée par une quasi disparition des taxons de la forêt tropicale humide dans le diagramme pollinique (point 1.4 du chapitre Résultats), est assez dispersée : les points 58 à 56 devraient plutôt être pris dans la zone 1B, et les points 55 à 54 plutôt dans la zone 2B. À l'inverse, l'analyse cluster permet clairement d'identifier

une distinction entre la zone 1B, 2A et 2B. La zone 2A a livré le plus grand nombre d'échantillons stériles, le faible effectif n'est probablement pas représentatif de cette zone et peut être à l'origine de cette contradiction. Les points de la zone 2B (de 52 à 38) sont regroupés dans le secteur du graphe correspondant à un environnement sec et fermé, témoins de la prédominance des taxons d'arbres et d'arbustes dans l'enregistrement pollinique.

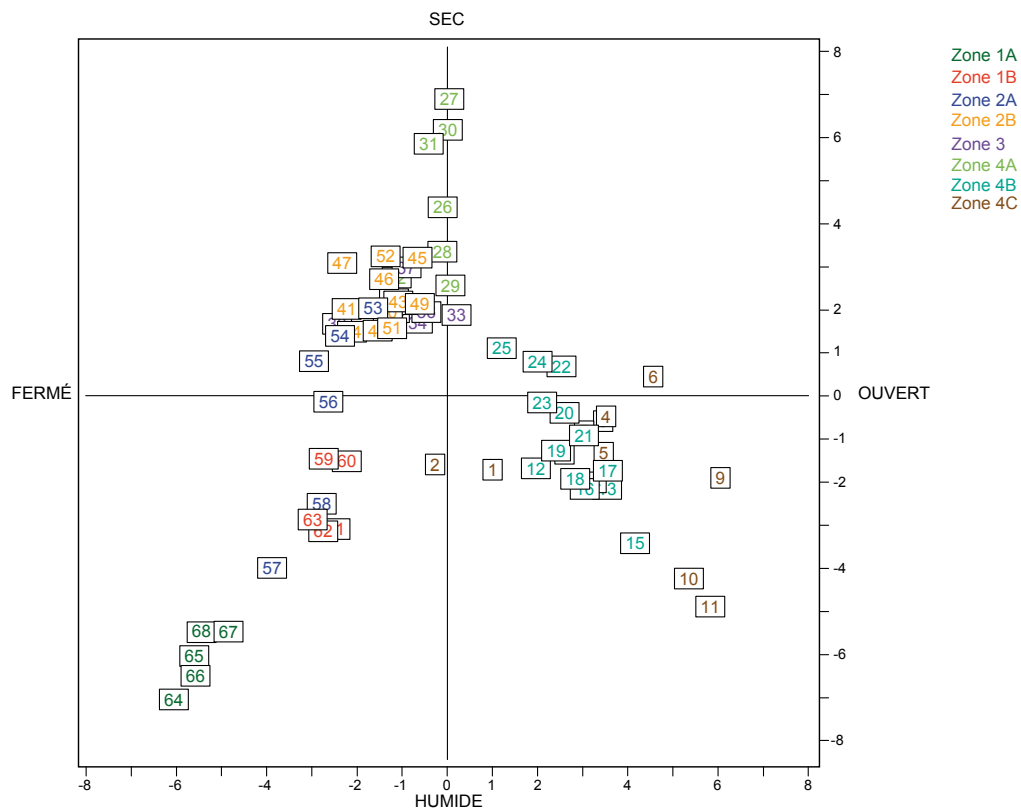


Figure 2 : Répartition statistique des spectres polliniques

Comme les résultats obtenus avec l'analyse cluster, la zone 3 dans l'ACP est statistiquement proche de la zone 2B. Nous avons cependant prit le parti de les dissocier, la zone 3 étant marquée par la progression des Mimosoidae, des Araliaceae d'*Ascarina* et de *Peperomia*, reflétant des conditions climatiques plus stables et plus humides. Ces variations sont sans doute trop petites pour être détectées par les analyses statistiques.

La zone 4A, constituée des points 32 à 26, se situe sur l'axe sec-humide, au niveau des valeurs positives (milieu sec). À cette période, les taxons introduits progressent et les

feux sont plus fréquemment enregistrés (point 1.5 du chapitre Résultats). Les activités humaines commencent à dégrader la végétation, les incendies favorisent l'ouverture et la sécheresse du milieu. Les taxons de la forêt tropicale humide et de la forêt semi-décidue sont alors concentrés dans une zone refuge. Les zones 4B et C se positionnent dans les valeurs positives de l'axe ouvert-fermé (milieu ouvert) et dans les valeurs négatives de l'axe sec-humide (milieu humide). La forte influence des activités anthropiques sur la végétation (horticulture et feux) est à l'origine de l'ouverture du paysage. Les conditions humides sont associées à la progression des taxons de marécage, mais, nous l'avons vu plus haut, celle-ci est en réalité apparentée à une baisse du niveau d'eau dans le marais d'Emaotfer. Par rapport aux autres échantillons des zones 4B et 4C, les points 2 et 1 sont localisés plus près des valeurs négatives de l'axe ouvert-fermé. Le paysage se referme et la végétation naturelle se développe, indiquant une baisse de la pression anthropique.

## 1.2. Particularités du paléoenvironnement du lac Otas

### 1.2.1. Données sédimentologiques et de microfaune

Le lac Otas, localisé à 500 m du bord de mer, est profond de 6 m, le niveau d'eau pouvant varier de  $\pm 60$  cm (Sémah et Wirrmann, 2006). Ce lac est en majorité alimenté par les pluies, et, dans une moindre mesure, par le ruissellement. La carotte Ota2 est composée d'une alternance de sédiments organiques et de niveaux sableux, riches en coquilles et coraux (voir le point 2.1. du chapitre Résultats)

Le modèle d'âge indique une variation notable des taux de sédimentation. Ils peuvent être très importants : ainsi 50 cm de matière organique et de sable se sont déposés autour de 600 ans cal BP ; d'autre part, il ne s'est accumulé que 30 cm entre 1000 et 800 ans cal BP. Des bioclastes roulés ont été observés dans les niveaux sableux, et témoignent de remaniement des dépôts lors de la présence de l'eau de mer.

Une analyse de foraminifères a été réalisée par J-P. Debenay, les résultats des déterminations sont en Annexe 14. La signification écologique des taxons les plus fréquemment rencontrés est basée sur Debenay (2012) et Murray (2014). Ces données ont permis d'apporter des informations sur la dynamique du littoral. Ainsi, la présence, avant 600 ans cal BP, d'*Amphistenia radiatia*, espèce caractéristique des espaces ouverts sur l'océan, témoigne de l'existence d'une lagune. L'étendue d'eau est séparée de la mer

par un cordon littoral, mais une connexion avec le milieu océanique devait se réaliser au moyen de passes. Lors d'une fermeture partielle ou temporaire de ce cordon, l'arrivée d'eau douce, par les pluies et le ruissellement, devient majoritaire, et permet le dépôt de matière organique. À 600 ans cal BP, des oospores (cellules femelles fécondées) de Characées, algues d'eau douce à saumâtre, sont identifiées dans le sédiment. Ces algues illustrent la fermeture totale de la lagune, celle-ci évoluant en un lac : les brèches du cordon littoral se sont comblées, limitant l'arrivée de l'eau de mer. Cependant, une succession de niveaux sableux indique que l'océan continue d'envahir régulièrement le site. Dans ces dépôts, des oospores de Characées sont à nouveau observées, ainsi que des foraminifères benthiques d'eau peu profonde, voire de zone intertidale, comme *Baculogypsium*. Le genre *Cymbaloporetta*, se développant sur des débris coralliens à faible profondeur, est aussi régulièrement identifié. La présence de ces taxons montre une plus faible influence de la mer sur le lac Otas, moins conséquente après 600 ans cal BP.

#### 1.2.2. Données palynologiques

L'observation du diagramme pollinique détaillé révèle une plus faible diversité floristique autour du lac Otas : au total, 75 taxons ont pu être identifiés, et 5 seulement différent de ceux retrouvés à Emaotfer. Les taxons du littoral dominant la végétation, ils constituent à eux seuls entre 50 et 80 % des grains de pollen déterminés dans chaque échantillon. Une telle représentation de la flore côtière n'a rien de surprenant, puisque le lac est situé à 500 m du bord de mer. En revanche nous pouvons noter le très faible développement de la mangrove. La côte est, où se trouve notre site d'étude, est exposée aux alizés (Cillauren et al., 2002), alors que la mangrove prospère plutôt au niveau des baies abritées du vent (Tomlinson, 1994). Ces conditions climatiques et les régulières inondations causées par la mer empêchent l'installation de taxons non adaptés à ce type d'environnement particulier, et explique la plus faible diversité végétale.

Très peu de plantes introduites ont été identifiées dans la carotte Ota2, seuls quelques échantillons datés de 600 ans cal BP contiennent des grains de pollen appartenant à ce type de flore. L'Homme a peu modifié le paysage, l'enregistrement du lac Otas présente une image de la végétation naturelle. Il sera ainsi possible de compléter les données polliniques d'Emaotfer pour le dernier millénaire. Cependant, les niveaux sableux, stériles en grains de pollen, limitent la résolution temporelle de l'étude.

### 1.2.3. Analyses statistiques ACP

De même manière que pour l'enregistrement pollinique d'Emaotfer, l'analyse en composantes principales a été appliquée à toutes les zones polliniques non stériles de la carotte Ota2. Les figures 3 et 4 renseignent sur la distribution des taxons et des spectres polliniques sur le plan factoriel formé par les 2 premiers axes (biplot). Au total, 26 taxons les mieux représentés tout au long de la séquence composent la matrice de calcul. Ces variables correspondent aux genres et familles exposés dans le diagramme pollinique d'Otas (point 2.3 du chapitre Résultats). Cependant, une analyse en composante principale est fiable si au moins 15 spectres polliniques sont inclus dans le calcul. Au total, 15 échantillons ont donné des résultats pour le lac Otas et sont analysés avec l'ACP, mais ce petit nombre risque de biaiser l'étude statistique. L'interprétation des graphes doit donc se faire avec prudence.

L'observation des signaux statistiques sur le biplot (figure 3) permet aisément de déterminer l'axe vertical comme symbolisant le facteur d'humidité, grâce au regroupement des taxons de la forêt tropicale humide.

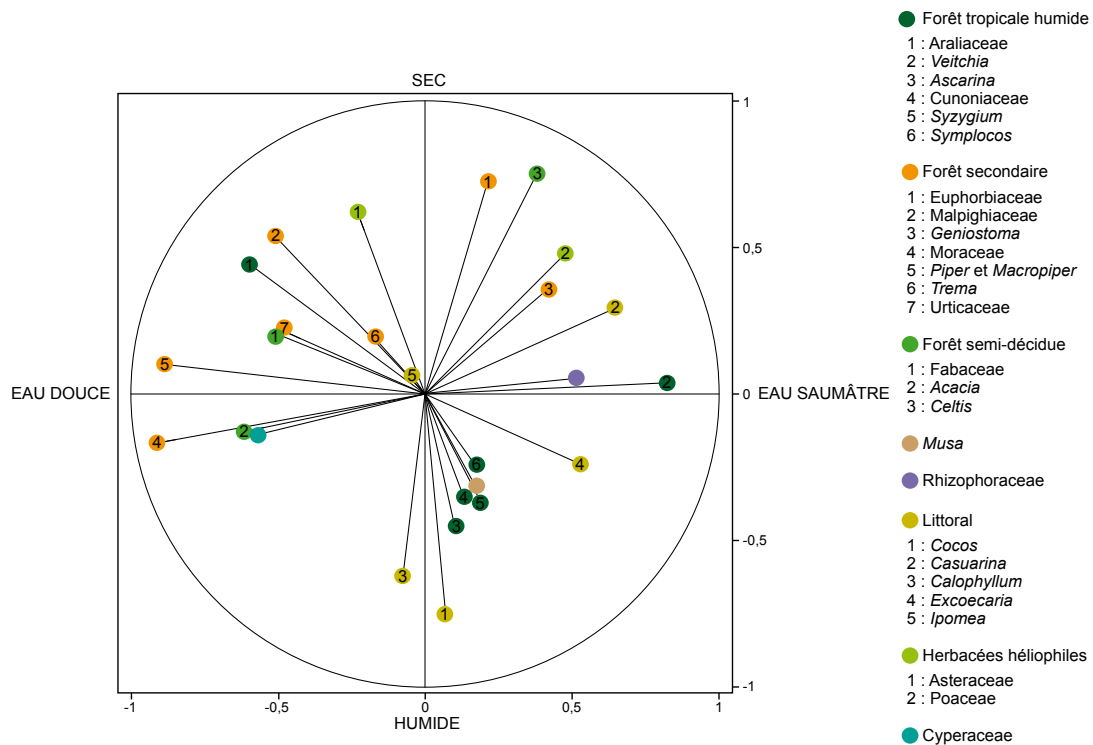


Figure 3 : Biplot des données polliniques. Les couleurs repèrent les associations végétales définies dans le diagramme pollinique d'Otas

En revanche, la dispersion des variables complique la tâche de la définition de l'axe horizontal. Nous pouvons noter que la plupart des taxons du littoral sont concentrés dans la partie droite du biplot et que l'autre partie se compose de plantes faiblement représentées dans le diagramme pollinique lorsque la végétation côtière est riche et diversifiée. L'axe horizontal est donc déterminé comme caractérisant l'influence dominante de la mer (eau salée) ou des précipitations (eau douce) sur l'environnement.

La plante introduite *Musa* est regroupée avec la plupart des taxons de forêt tropicale humide. Ce genre est en effet uniquement identifié à 600 ans cal BP, une des périodes à laquelle la forêt humide est importante. Il est possible que les conditions environnementales plus humides aient aussi favorisé la culture de *Musa*.

À l'exception des Araliaceae et de *Veitchia*, dont les positions sont surprenantes, la distinction milieu sec - milieu humide est assez nette. L'observation du diagramme pollinique révèle que les Araliaceae ne se développent pas simultanément avec les autres taxons de la forêt humide et qu'ils augmentent surtout à partir de 600 ans cal BP, lorsque la lagune se ferme et devient un lac. À cette période, l'eau douce remplace graduellement l'eau salée ou saumâtre dans le réservoir. Dans ce cas, la progression des Araliaceae pourrait donc être avant tout limitée par l'influence de la mer plutôt que par les conditions de précipitations. L'emplacement du genre *Veitchia* dans le biplot (figure 3) montre une corrélation très forte avec la présence de la lagune. Même si ce palmier est caractéristique de la forêt tropicale humide, sa croissance rapide et sa facilité d'adaptation à des environnements tropicaux variés (Smith, 1979) lui permettent de se développer près des zones littorales, où il supporte l'exposition au vent.

Nous pouvons aussi noter la dispersion des taxons de la forêt secondaire le long de l'axe eau douce-eau saumâtre (salée). Le genre *Homalanthus*, taxon de la famille des Euphorbiaceae le plus fréquemment retrouvé à Otas, et le genre *Geniostoma* supportent des conditions environnementales liées aux zones littorales (exposition aux vents, sols sableux), alors que les autres taxons de la forêt secondaire ou de la forêt semi-décidue ne tolèrent pas ce type de milieu (Smith, 1979 ; Wheatley, 1992). Le développement des Cyperaceae est surtout marqué au moment de la fermeture totale de la lagune, ce qui explique la forte corrélation de cette famille avec les valeurs négatives de l'axe eau douce-eau saumâtre.

La multitude d'axes issue de l'ACP est présentée dans des tableaux de corrélations variables (taxons)-facteurs (axes) en Annexe 8B. Les calculs effectués sont les mêmes que pour les résultats d'Emaotfer.

La majorité des axes opposent la végétation avantagée par la présence d'eau saumâtre (ou tolérante) à celle favorisée par l'eau douce : les Araliaceae et *Veitchia* sont les principaux taxons qui se différencient statistiquement de la végétation de la forêt humide ou de la forêt semi-décidue. Dans le cas d'Otas, l'influence de la mer semble constituer le facteur dominant de modifications de la végétation. Bien qu'un peu moins fréquent, les axes opposant les genres et les familles exigeants en humidité à une flore supportant des conditions environnementales plus sèches sont bien représentés. Un troisième type d'axe distingue les arbres et arbustes des herbacées, principalement des Asteraceae. L'influence de l'ouverture du paysage et celui des conditions de précipitations sont de même importance.

La présence de la mer complique l'interprétation du diagramme pollinique. L'observation de la dispersion des spectres polliniques (figure 4) sur les deux axes eau douce-eau saumâtre et sec-humide apporte des informations complémentaires à l'analyse cluster.

Les points de la zone 1, de 15 à 13, sont regroupés dans les valeurs positives de l'axe eau douce-eau saumâtre et dans les valeurs négatives de l'axe sec-humide. La disposition des points montre une humidification de l'environnement. La zone 2A se positionne dans les valeurs négatives des deux axes, illustrant des conditions humides et une plus faible influence de la mer sur le site d'Otas. Ces résultats statistiques sont cohérents avec les observations issues du diagramme pollinique.

Les points de la zone 2B, de 10 à 7, sont dispersés alors que l'analyse cluster permet de les rassembler. Cependant, ces points se situent tous dans la zone du graphe caractérisée par une forte présence des taxons côtiers et un environnement relativement sec. Une telle dispersion avec l'ACP reste difficile à expliquer.

Les points 4, 5 et 6 de la zone 3A sont concentrés autour de l'axe sec-humide au niveau des valeurs négatives (milieu humide). Ces résultats correspondent avec ceux de l'analyse pollinique. En revanche, les points 3 et 2 sont situés dans les valeurs positives de l'axe sec-humide et illustrent une baisse de l'influence de l'eau saumâtre. Ces deux



échantillons marquent une transition vers le point 1, lorsque l'eau douce remplace l'eau saumâtre dans le lac et que les Araliaceae se développent.

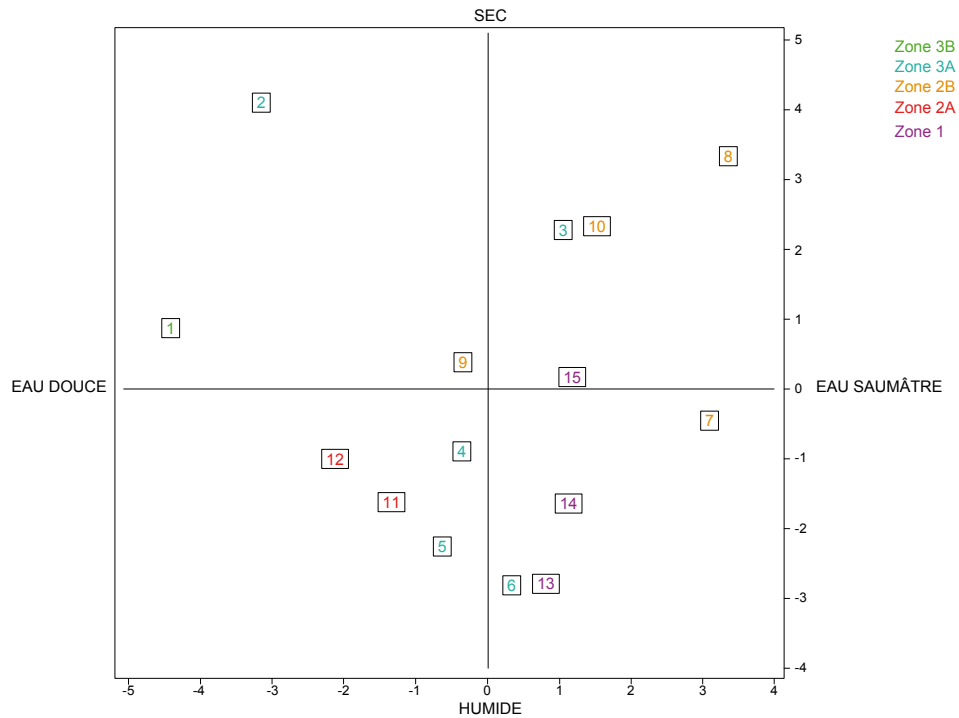


Figure 4 : Répartition statistique des spectres polliniques

## 2. Influence des événements naturels et des activités humaines sur la végétation à l'Holocène supérieur au Vanuatu central

### 2.1. Réponse de la végétation aux changements naturels à l'Holocène supérieur

#### 2.1.1. Cas du marais d'Emaotfer

Afin de faciliter la lecture, nous avons choisi de présenter dans cette partie un extrait du diagramme pollinique issu du chapitre « Résultats » en excluant les taxons introduits (figure 5).

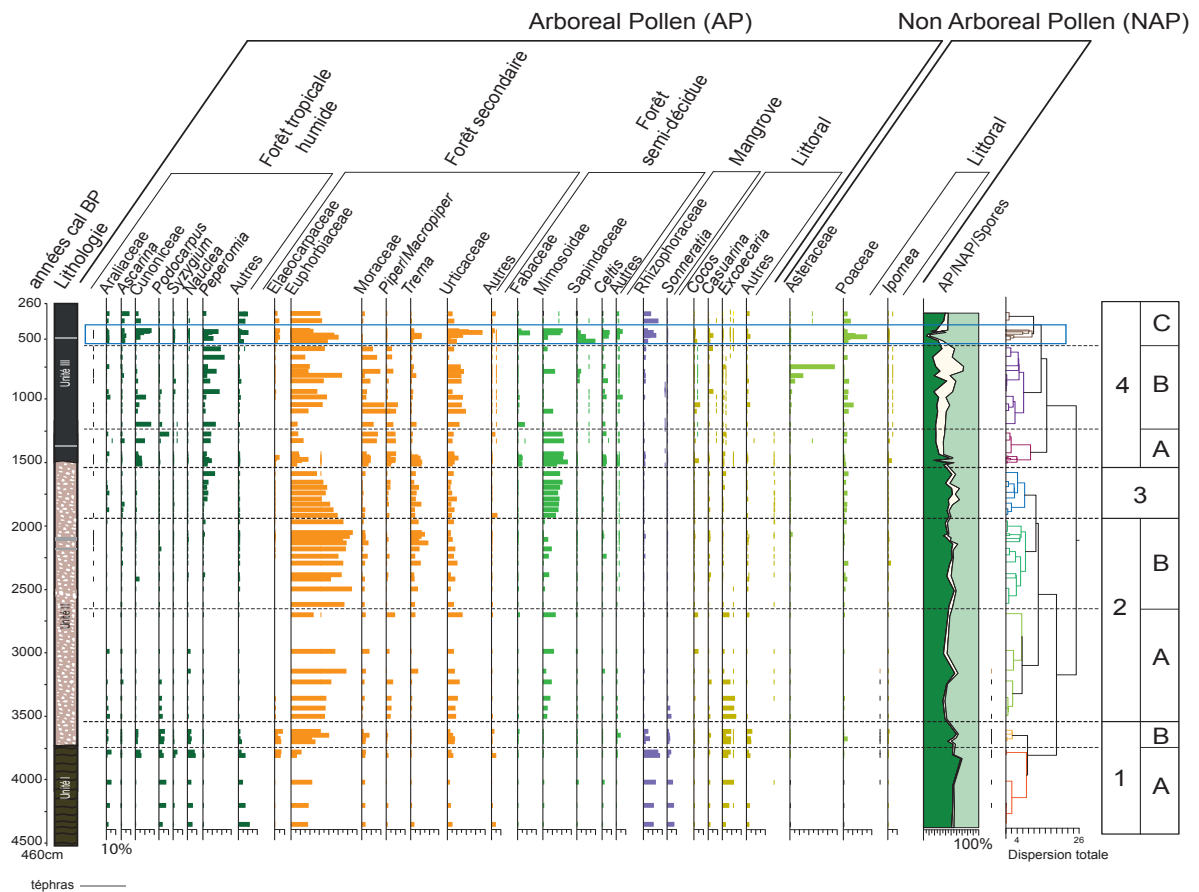


Figure 5 : Extrait du diagramme pollinique d’Emaotfer présenté dans le chapitre Résultats (point 1.4). Les taxons introduits ont été exclus de la somme de base

Plusieurs changements notables de la végétation du marais d’Emaotfer ont pu être décrits. Tout d’abord, le recul de la mangrove, forêt dont le développement n’est possible qu’en présence d’une eau salée et dans une baie abritée du vent, se produit vers 3700 ans cal BP. La mangrove est alors remplacée par de la végétation côtière et d’arrière-mangrove, comme *Excoecaria*. Ces taxons diminuent à leur tour vers 2700 ans cal BP, mais sont régulièrement observés en faible proportion tout au long de la carotte. La mangrove étant majoritairement dépendante de la présence d’eau salée à saumâtre, ces évènements traduisent une baisse du niveau de la mer entre 3700 et 2700 ans cal BP. Les datations obtenues sur des récifs coralliens fossiles des îles du Pacifique sud-ouest ont montré que le niveau de la mer a augmenté au cours de l’Holocène inférieur et moyen, suite à la fonte des glaciers formés lors du Dernier Maximum Glaciaire (Cabioch et al., 2003). Cette hausse eustatique de la mer se termine entre 6000 et 4000 ans BP, suivie d’une baisse hydro-isostasique\* au cours de l’Holocène supérieur (Dickinson,

2001, 2003). Il s'agit d'une réaction de la croûte terrestre, affaissée par la charge des masses d'eaux additionnelles issues de la fonte des glaciers. Au Vanuatu, la surrection constante de l'archipel, due à la subduction de la ride d'Entrecasteaux, doit aussi être prise en compte : au cours du Quaternaire, le sud de l'île d'Efate s'est soulevé de 1 mm/an en moyenne (Lecolle et al., 1990, Neef et Veeh, 1977). Ainsi, la baisse hydroisostatique, amplifiée par le soulèvement tectonique constant, est à l'origine de la diminution du niveau de la mer enregistrée par la végétation à Emaotfer.

Ce recul, à 3700 ans cal BP, entraîne la quasi disparition de la mangrove, remplacée par *Excoecaria*, genre caractéristique de l'arrière-mangrove, et des taxons du littoral. Des changements de végétation similaires sont observés à la même période sur d'autres îles du Pacifique sud-ouest, elles aussi soumises aux mouvements tectoniques de la zone de subduction Pacifique-Australie (Fall et al., 2005 ; Hope et al., 2009). La présence d'une plage à 3000 ans BP est confirmée par l'étude sédimentologique du cimetière de Teouma (voir point 1.1.1.). La surrection de l'île d'Efate engendre la régression continue de la mer et de la flore côtière. À partir de 2700 ans cal BP, le littoral est trop éloigné du site pour que les variations du niveau de l'océan soient enregistrées dans la pluie pollinique atteignant le marais.

La diminution importante de la forêt tropicale humide de basse altitude (Araliaceae, *Podocarpus* et *Nauclea*), remplacée principalement par de la forêt secondaire, se produit aussi à 3700 ans cal BP, soit avant l'arrivée des premières populations, et est donc associée à un évènement naturel. La mer, à proximité du site avant 3700 ans cal BP, avait probablement une influence sur la hauteur des nappes phréatiques, et son recul a occasionné la baisse du niveau piézométrique, à l'origine d'un environnement plus sec. Cependant, même si les analyses sédimentologiques (comme une augmentation de la densité sèche) témoignent bien d'un niveau d'eau plus bas dans le marais après 3700 ans cal BP (Wirrmann et al., 2011a), la présence de *Gomphodella sp.* (figure 6) indique que le plan d'eau ne s'est jamais asséché. De plus, sous des conditions climatiques humides, le niveau de l'eau dans des nappes phréatiques aurait remonté, et une telle proportion de forêt secondaire ne serait pas observée jusqu'à 2000 ans cal BP. Nous pouvons en déduire que le retrait de la mer a eu un impact à court terme sur l'environnement autour d'Emaotfer et qu'il ne constitue pas le facteur principal de changement de la végétation.

De nombreuses reconstitutions paléoclimatiques pour le Pacifique sud (côte est de l'Amérique du Sud, Océanie et Asie du sud-est) ont pu être obtenues par des modèles (eg. Clément et al., 2001 ; Ganopolski et al., 1998), des analyses sédimentologiques (eg. Conroy et al., 2008 ; Moy et al., 2002 ; Rees et al., 2015), palynologiques et de charbons (eg. Biagioni et al., 2015 ; Donders et al., 2007 ; Haberle et al., 2001 ; Lynch et al., 2007 ; Rees et al., 2015), malacologiques (Sandweiss et al., 2001), ainsi que par des études isotopiques sur des spéléothèmes (eg. Griffiths et al., 2010 ; Partin et al., 2013), des coraux (eg. Corrège et al., 2000) ou des foraminifères (eg. Gagan et al., 2004). Toutes ces données paléoclimatiques indiquent une augmentation de la variabilité des phénomènes ENSO à partir de 5-4200 ans BP. La fréquence et l'amplitude des événements El Niño s'accroît à partir de 3200 ans BP, et devient supérieure à celle actuelle entre 2700 et 1700 ans BP. Ainsi, entre 5000 et 1700 ans BP, les saisons sèches sont accentuées et la variabilité climatique est élevée. Des liens ont pu être déterminés entre les El Niño et l'intensité de la mousson, les déplacements de l'ITCZ et de la SPCZ, mais le sujet reste débattu (Denniston et al., 2013, 2014 ; McRobie et al., 2015 ; Partin et al., 2007 ; Renseen et al., 2005 ; Steinke et al., 2014). La mousson Indonésienne-Australienne se serait ainsi affaiblie à partir de 4000 ans BP (Denniston et al., 2013, 2014), à l'origine aussi d'un climat plus sec. La forêt tropicale humide a supporté les premiers El Niño rapprochés, mais l'amplification de ces événements et la baisse du niveau d'eau des nappes phréatiques ont été à l'origine de sa chute. Il est possible que l'environnement plus sec ait aussi déstabilisé la mangrove, accélérant sa diminution lors du retrait de la mer. L'instabilité des conditions climatiques a favorisé le développement des taxons de la forêt secondaire, au détriment d'une végétation plus mature, progressant plus lentement.

La majorité des analyses indique des épisodes d'El Niño vraiment conséquents à partir de 3200 ans BP, alors que la végétation autour du marais d'Emaotfer illustre des conditions plus sèches dès 3700 ans cal BP. La localisation géographique du Vanuatu est sans doute à l'origine de ce décalage : l'archipel est en effet situé dans la limite méridionale de l'extension de la SPCZ durant été austral. Le moindre changement de position de la zone de convergence affecte donc le climat du Vanuatu. Ainsi, la variabilité climatique enregistrée sur cet archipel est plus importante que sur les autres îles d'Océanie ou d'Asie du sud-est situées plus au nord (Corrège, T., pers. com.). Au Vanuatu, le climat a pu changer dès les premiers événements El Niño rapprochés et forts, vers 5-

4200 ans BP. Des analyses palynologiques des Fiji, un archipel localisé aussi au niveau de la limite sud de la SPCZ, montrent une ouverture du paysage et une progression de la forêt secondaire, accompagnée parfois de feux, à partir de 4500 ans cal BP (Hope et al., 2009 for a review).

Les premières populations atteignent l'île d'Efate vers 3100 ans cal BP et avant 1300 ans cal BP, l'impact des activités humaines n'est pas clairement visible dans le diagramme pollinique. Entre 3700 et 1950 ans cal BP, la forêt secondaire domine le paysage, seuls quelques taxons de la forêt semi-décidue, principalement les Fabaceae et les Mimosoidae, sont présents, surtout entre 3500 et 2700 ans cal BP. Cependant, la surestimation de taxons pionniers comme *Macaranga* peut exagérer l'ouverture du paysage reconstituée par les grains de pollen. La variabilité climatique atteint son maximum entre 2500 et 1500 ans BP (Brieker et al., 2007 ; Conroy et al., 2008 ; Denniston et al., 2013, 2014 ; Donders et al., 2007 ; Gagan et al., 2004 ; McGregor et Gagan, 2004 ; Moy et al., 2002), nous pouvons donc supposer que les conditions environnementales plus stables avant 2500 ans BP permettaient le développement de la forêt semi-décidue. Bien qu'une ouverture de la végétation à cette période ne soit pas toujours associée à une installation humaine (Hope et al., 2009 for a review, Hunter-Anderson, 2013 ; Wirrmann et al., 2011b), les activités anthropiques favorisent un état de végétation dégradée. Les résultats des déterminations de la microfaune à Emaotfer (Wirrmann et al., 2011a - figure 6) favorise l'hypothèse du climat : entre 2500 et 2140 ans cal BP, l'espèce de diatomée *Cymbella cymbiformis* diminue, illustrant une nouvelle baisse du niveau d'eau dans le marais. Ce changement est difficilement attribuable à l'Homme, et le faible pourcentage de la végétation côtière dans le diagramme pollinique indique que l'océan est loin du site, les variations du niveau de la mer n'ont probablement plus d'impact à cette période sur le niveau de l'eau contenue dans le karst. De plus, les déterminations de phytolithes et de grains d'amidon n'ont pas montré d'horticulture à cette période à proximité du marais d'Emaotfer.

L'analyse des charbons n'a pas non plus révélé la présence significative de feux avant 1800 ans cal BP. Dans le Pacifique, une augmentation des incendies est très souvent associée à une installation d'une population à long terme (Spriggs, 2010 for a review). La végétation autour du marais d'Emaotfer présente une dynamique particulière : une forêt secondaire dominante et des feux presque absents. Cette dynamique est différente de

celle observée dans le Pacifique sud-ouest, où une progression des plantes pionnières et des herbacées est associée à une augmentation des charbons. Ces événements sont interprétés comme un impact anthropique (Denham et Haberle 2008 ; Fall, 2005 ; Hope et al., 2009 for a review ; Stevenson, 2004). La comparaison de ces résultats palynologiques avec les nôtres favorise l'hypothèse d'une faible influence humaine sur la flore du marais d'Emaotfer.

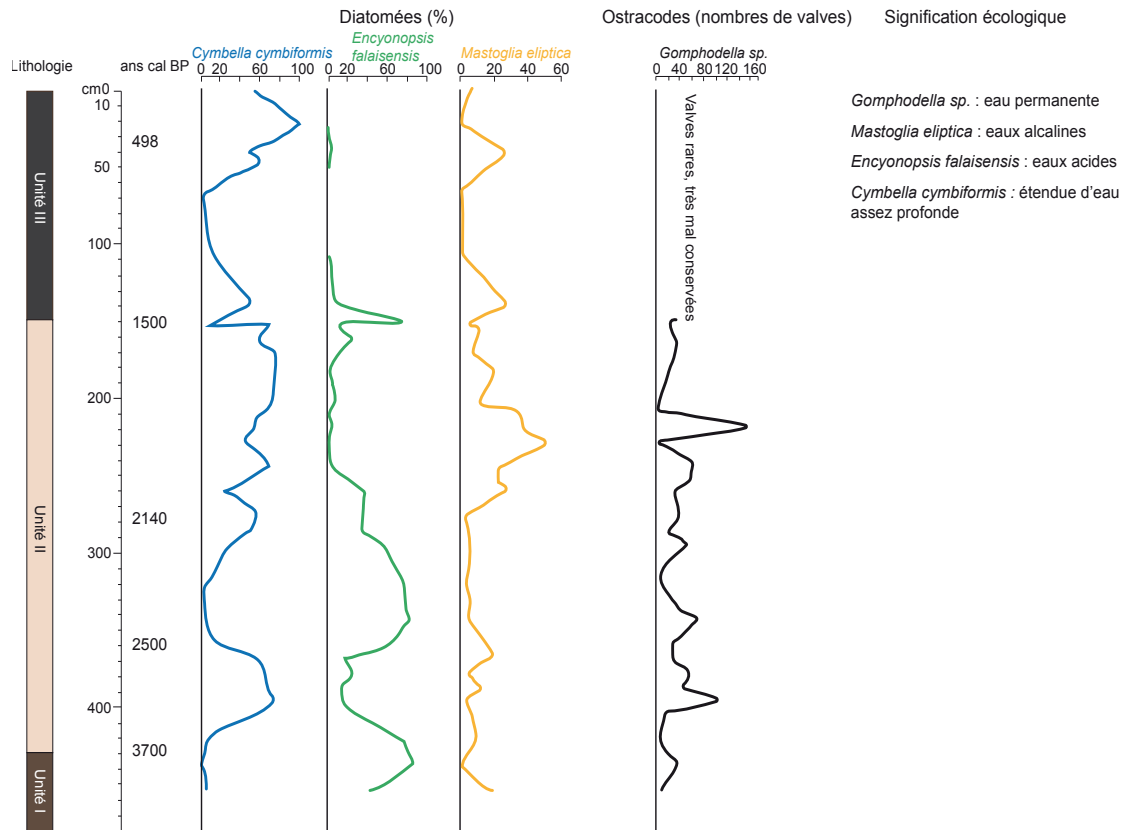


Figure 6 : Présence des diatomées et des ostracodes dans la carotte Tfer06. D'après Wirrmann et al., 2011a

Le petit nombre de charbons identifiés dans les échantillons datés jusqu'à 1800 ans cal BP peut s'expliquer par la forte variabilité climatique présente au Vanuatu à cette période. Un régime de feu est sensible aux conditions environnementales (climat, type de biomasse par exemple), et si l'un de ces facteurs est modifié dans un intervalle de temps plus court que celui qui sépare deux incendies, alors le régime de feu ne pourra pas se mettre en place (Whitlock et al., 2010). Nos données de charbons illustrent des incendies occasionnels, et non récurrents, témoins d'une absence d'un régime de feu.

Jusqu'à 1950 ans cal BP, l'important développement de la forêt secondaire est donc probablement influencé par la forte variabilité climatique et non les activités humaines. Entre 1950 et 1300 ans cal BP, la forêt secondaire est remplacée par la forêt semi-décidue et la forêt tropicale humide. La progression de la diatomée *Cymbella cymbiformis* (figure 6) témoigne d'une augmentation du niveau de l'eau dans le marais. La hausse du taux de sédimentation, à partir de 2100 ans cal BP, et de la diatomée *Mastogloia eliptica*, caractéristique d'une eau alcaline (témoignant d'apports d'eaux riches en ions), indiquent une intensification des précipitations. Les données paléoclimatiques mettent en évidence une baisse de la fréquence et de l'intensité des évènements El Niño, à l'origine d'un climat plus humide (Cobb et al., 2013, for a review ; Moy et al., 2002). L'analyse des charbons illustre une augmentation des feux à partir de 1800 ans cal BP. Un renforcement des incendies en période humide, alors que le paysage se ferme, semble contradictoire, mais peut s'expliquer : les pluies vont favoriser le développement des arbres, une source de biomasse (donc de combustible) notable, et les orages, principaux éléments naturels pouvant déclencher des feux, deviennent plus fréquents avec la hausse des précipitations (Daniau et al., 2013 ; Veblen and Kitzberger, 2002). Cette dynamique végétale est donc probablement influencée par des changements environnementaux sans lien avec des activités anthropiques.

Les 1300 dernières années à Emaotfer sont un peu particulières, car les activités humaines ont un impact évident sur le paysage, et il a été montré que les communautés végétales présentes autour d'un marais se dégradent fortement face à une pression anthropique (Cole et al., 2015). Le diagramme de la figure 5 est réalisé sans les taxons introduits dans la somme de base, afin d'obtenir des informations sur la végétation naturelle.

À partir de 1300 ans cal BP, une nouvelle progression de la forêt secondaire, en particulier les Euphorbiaceae, Moraceae et Urticaceae, est observée. Ces taxons sont aujourd'hui très fréquents près des habitations (Slik et al., 2003 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Wheatley, 1992). De plus, nous pouvons noter la présence significative des herbacées (Asteraceae et Poaceae). Dans la zone 4C, les Euphorbiaceae et les Urticaceae dominent la végétation. Après 1500 ans cal BP, et surtout entre 1100 et 950 ans cal BP, la proportion de feux augmente autour du marais d'Emaotfer. Cette dynamique de végétation, caractérisée par un paysage ouvert et des incendies fréquents, est le reflet

des activités anthropiques. Elle est similaire à ce qui a pu être observé dans le Pacifique sud-ouest lors des installations humaines, comme nous l'avons exposé plus haut.

À cette végétation dégradée par l'Homme s'ajoute plusieurs taxons de la forêt tropicale humide, majoritairement des Cunoniaceae et *Peperomia*, jusqu'à 750 ans cal BP, où les Cunoniaceae régressent. À partir de 530 ans cal BP (1420 AD), cette forêt se diversifie, avec le développement des Araliaceae, *Ascarina* et *Syzygium*. La forêt semi-décidue est rare dans la zone 4B, mais elle progresse et se diversifie dans la 4C. L'environnement reste humide jusqu'à 750 ans cal BP, puis l'essor de la forêt mixte (taxons de forêt tropicale humide et de forêt semi-décidue) souligne des conditions légèrement plus sèches. Entre 750 et 530 ans cal BP, seule la forêt secondaire persiste, témoin de la forte pression anthropique sur l'environnement. La dominance des taxons caractéristiques de la forêt de nuages (*Ascarina*, Cunoniaceae et *Peperomia*) peut témoigner d'une baisse des températures par rapport à la période 4500-3700 ans cal BP, où ces plantes sont peu représentées. La forêt de nuages se développe aujourd'hui à partir de 300 m d'altitude et supporte en effet des conditions environnementales plus fraîches que la végétation de basse altitude (Smith, 1979). Cependant, il est possible que ces taxons soient localisés au niveau d'une zone refuge, difficilement accessible à l'Homme (une zone pentue par exemple), et dans ce cas, ce type de flore pourrait persister grâce aux conditions environnementales locales.

Les variations climatiques qui ont eu lieu lors du dernier millénaire dans le Pacifique sud restent assez mal comprises, mais la plupart des analyses s'accordent sur les changements suivants : entre 1300 et 750 ans BP, une majorité d'événements La Niña de fortes fréquences et amplitudes se produisent, favorisant un climat plus humide dans le Pacifique sud-ouest (Cobb et al., 2003 ; Khider et al., 2011 ; Mohtadia et al., 2007 ; Rein et al., 2004 ; Wirrmann et al., 2006, 2011b) ; entre 750 et 200 ans BP, les El Niño deviennent les événements climatiques dominants (Firth et al., 2014 ; Khider et al., 2011 ; Mann et al., 2009 ; Matthey et al., 2011). La période datée entre 1300 et 750 ans BP a été définie grâce aux reconstitutions climatiques de l'hémisphère nord comme l'Optimum climatique Médiéval (Lamb, 1965 - Medieval Warm Period en anglais) et celle datée entre 750 et 200 ans BP comme le Petit Âge Glaciaire (Bradley et Jones, 1993 ; Crowley et North, 1991 - Little Ice Age en anglais). Tous les auteurs ne s'accordent pas sur le déroulement de ces événements, certains proposent un Optimum Médiéval sec et un Petit Âge Glaciaire humide (Barr et al., 2014 ; Vance et al., 2013 ; Yan et al., 2011),



mais tous conviennent d'une modification des conditions climatiques autour de 750-650 ans BP : une diminution de la température de surface de la mer et la prédominance, soit d'El Niño soit de La Niña. La sensibilité aux changements climatiques des divers sites étudiés pourrait expliquer une telle variation dans les résultats. Une étude récente des isotopes stables de l'oxygène d'un spéléothème du Vanuatu a confirmé un assèchement du climat lors du Petit Âge Glaciaire (Partin et al., 2013). Bien que la végétation à Emaotfer soit soumise à une pression anthropique lors du dernier millénaire, les paysages ont été malgré cela influencés par l'augmentation du nombre d'événements La Niña entre 1300 et 750 ans cal BP et par l'amplification des El Niño à partir de 530 ans cal BP.

La couche de téphras la plus récente datée de 498 ans cal BP (1452 AD) semble être associée à un changement de végétation. La forêt semi-décidue, les Poaceae et les Urticaceae progressent à la suite de ce dépôt, qui correspond probablement à l'éruption du Kuwae. La caldera du Kuwae est localisée sur l'île d'Epi, à 90 km au nord du marais d'Emaotfer. Une éruption datée entre 1452 et 1458 AD est reconnue comme l'une des plus importantes de ces derniers 10 000 ans (Gao et al., 2006 ; Pang 1993 ; Plummer et al., 2012). Elle s'est déroulée en plusieurs phases, éjectant 235-414 Tg (Téragramme) d'aérosols (Monzier et al., 1994 ; Witter et Self, 2006). La considérable quantité de particules projetées dans l'atmosphère lors de l'éruption du Kuwae a dû être suffisante pour bloquer les rayons du soleil pendant plusieurs années, affectant la biodiversité des îles alentour. Les cendres ont dû favoriser les pluies acides, aggravant la destruction de la végétation (Hoffman, 2007 ; Pang, 1993). Après cette éruption, une végétation supportant des conditions environnementales plus sèches s'est développée.

La réalisation de quantifications climatiques à l'aide de fonctions de densité de probabilité peut nous permettre de mieux déterminer l'impact des événements naturels sur la végétation. Nous avons pu ainsi reconstituer les variations possibles de températures et de précipitations minimum et maximum (figure 7). Les calculs ont été effectués avec et sans les taxons de la forêt secondaire. Ces plantes étant peu exigeantes en humidité (Annexe 9) et probablement surestimées dans le diagramme pollinique, les résultats obtenus étaient pratiquement identiques sur toute la carotte. Les figures issues des calculs prenant en compte la forêt secondaire sont en Annexe 15.

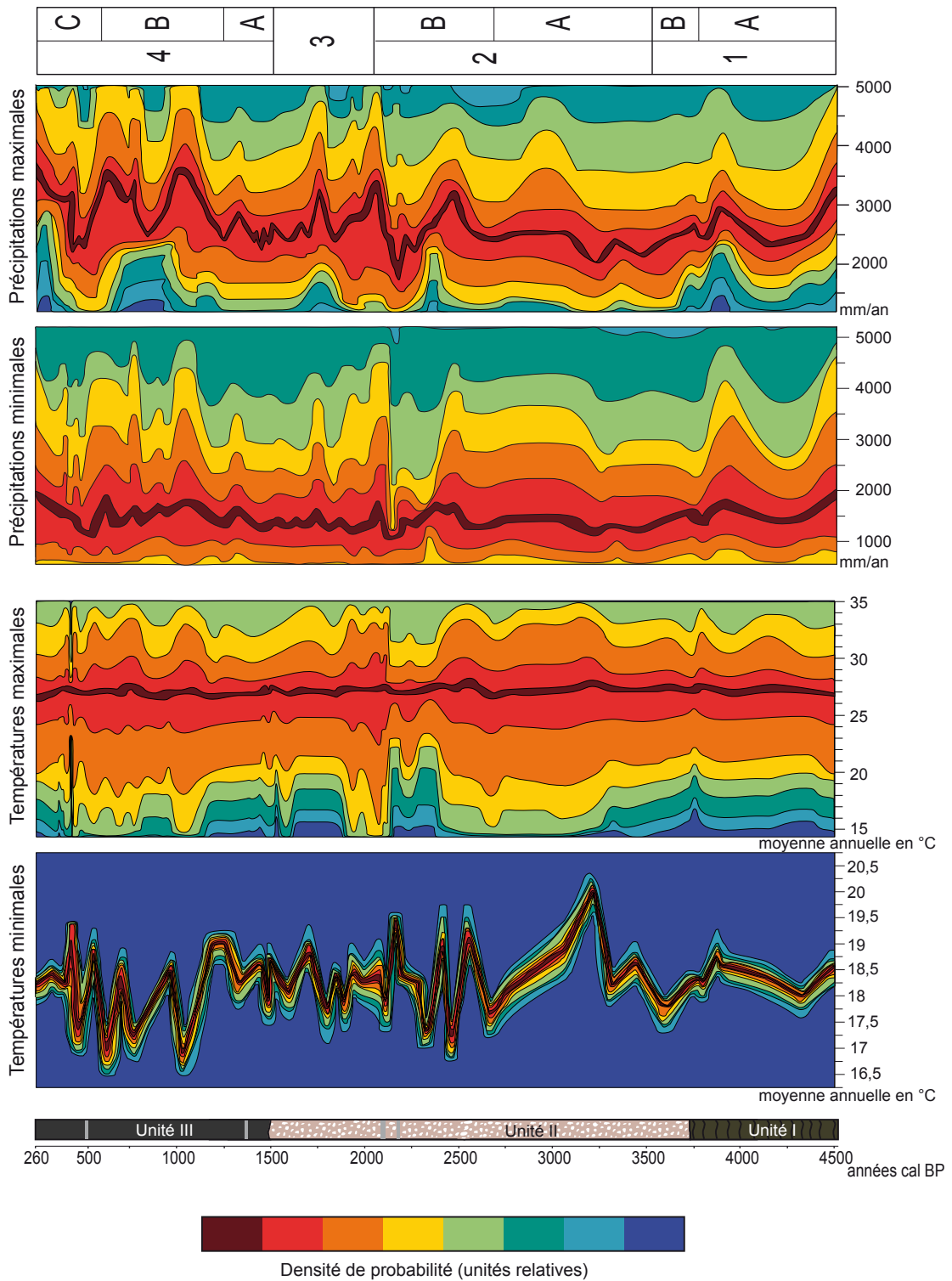


Figure 7 : Quantifications climatiques de la séquence pollinique du marais d'Emaotfer

Les reconstructions des températures montrent très peu de variations au cours du temps, mais ces résultats sont cohérents avec les relevés annuels à Port Vila (<http://www.meteo.gov.vu>) : en moyenne, les températures les plus basses sont comprises entre 16 et 21°C, et les plus élevées entre 26 et 30°C.

Nous pouvons cependant obtenir quelques informations à partir du graphique des températures minimales. Un pic est noté dans la zone pollinique 2A, mais il n'est constitué que d'un seul point, le résultat peut donc être difficilement interprété. Des écarts de 3°C entre les points de la courbe sont observés au niveau de la zone 2B, entre 2700 et 2000 ans cal BP, illustrant une plus forte variabilité climatique. Les variations se réduisent dans les zones 3 et 4A, (températures comprises entre 18 et 19,5 °C) entre 2000 et 1300 ans cal BP. Ces données confirment notre hypothèse de l'impact des événements El Niño sur la végétation d'Emaotfer. Les températures diminuent dans la zone 4B et le début de la zone 4C, et atteignent la valeur minimale de 16,5°C. À cette période nous avons identifié la présence importante de taxons de la forêt de nuages, les Cunoniaceae et *Peperomia*, supportant des températures plus faibles. Plusieurs niveaux de téphras sont visibles dans la carotte, mais seul le plus récent, daté autour de 1450 AD, semble associé à un changement climatique. Une nouvelle baisse de température est en effet observée après ce dépôt de téphras, qui correspond probablement à l'éruption du Kuwae. Les particules émises lors d'une éruption peuvent influencer le climat à court terme (10 à 20 ans maximum pour une importante éruption) : en réduisant les radiations solaires, les aérosols refroidissent la surface de la Terre de quelques W/m<sup>2</sup>, (Crowley, 2000), diminuant ainsi la température d'environ 0.1-0.2°C. La considérable quantité de particules projetées dans l'atmosphère lors de l'éruption du Kuwae a dû être suffisante pour bloquer les rayons du soleil pendant plusieurs années, abaissant la température, affectant la flore, la faune et les populations.

La courbe des précipitations minimales varie peu, mais l'observation du graphe des précipitations maximales fournit des résultats exploitables. Ainsi, les pluies diminuent, de 3300 à 2300 mm/an, au niveau des zones polliniques 1A et 1B. Dans la zone 2A, les précipitations sont assez constantes, au-dessus de 2000 mm/an, alors que dans la zone 2B, celles-ci sont plus variables, et atteignent une valeur minimale de 1900 mm/an. Ces résultats sont cohérents avec les analyses palynologiques et témoignent de conditions environnementales plus sèches et plus instables. Dans les zones 3 et 4A les

précipitations augmentent, et oscillent autour de 3000 mm/an, indiquant des conditions plus humides après 2000 ans cal BP. De la même manière qu'avec les températures, ces nouvelles données favorisent l'hypothèse de l'influence des changements climatiques sur la végétation. L'Homme devient le principal facteur de modification du paysage dans les zones 4B et 4C, à partir de 1300 ans cal BP. Bien que la composition et la structure de la végétation soient très probablement marquées par l'impact anthropique, les quantifications climatiques nous permettent d'obtenir des informations sur les régimes des pluies de cette période. Les précipitations au niveau de la zone 4B présentent d'importantes fluctuations (entre 2500 et 3500 mm/an), et témoignent de conditions environnementales humides, comme pour les zones 3 et 4A, mais aussi plus instables. L'amplitude et la fréquence marquées des événements La Niña de cette période est à l'origine d'une importante variabilité climatique (Goodwin et al., 2013 for a review ; Mohtadia et al., 2007). La zone 4C se différencie de la 4B par une baisse importante des pluies, atteignant 2300 mm/an, puis par nouvelle augmentation jusqu'à la fin de l'enregistrement. Cette chute coïncide avec le dépôt de téphras correspondant à l'éruption du Kuwae. Cependant, si la diminution des températures est une conséquence bien connue des importantes éruptions volcaniques (eg. Briffa et al., 1998 ; Crowley, 2000 ; Robock, 2002 ; Sear et al., 1987), l'effet de ces événements sur les précipitations constitue un sujet étude récent. Les premiers résultats favorisent l'hypothèse de pluies plus faibles après une éruption comme celle du Pinatubo en 1991 ou celle de El Chichón en 1982 (Haywood et al., 2013 ; Trenberth et Dai, 2007). Selon Firth et al. (2014), le renforcement des phénomènes El Niño dans le Pacifique sud et les plus faibles précipitations seraient une conséquence de la constante activité du volcan vanuatais Yasur, sur l'île de Tanna entre 650 et 200 ans BP (Petit Âge Glaciaire). La diminution des précipitations observées sur le graphe de la figure 6 vers 1450 AD peut donc être liée à l'éruption consécutive du Kuwae.

Pour nos interprétations, nous avons pris en compte les densités de probabilité les plus fortes (couleur rouge sombre), correspondant à l'espérance mathématique (la moyenne d'une fonction continue). Mais ces résultats ne peuvent être pas être dissociés des densités de probabilité plus faibles. Celles-ci atteignent des valeurs tellement importantes qu'il a été nécessaire de les contraindre graphiquement, afin de limiter les résultats à des paramètres météorologiques actuels possibles pour le Vanuatu : températures entre 15 et 35 °C et précipitations entre 1000 et 5000 mm/an

(<http://www.meteo.gov.vu>). Nos résultats doivent donc être pris en compte avec beaucoup de prudence, et nous ne pouvons pas développer une interprétation plus poussée que celle déjà réalisée, car nous risquons de nous baser sur des informations biaisées. Ces fonctions ont été appliquées pour la première fois sur des données palynologiques du Vanuatu, et il a été nécessaire de déterminer les espaces climatiques de chaque taxon intégré dans le calcul. Pour cela, nous avons associé les coordonnées géographiques des végétaux récoltés lors des missions de terrain et conservés à l'Herbier de Paris, avec des cartes de répartition des températures et des précipitations du Vanuatu (<http://www.meteo.gov.vu> ; Siméoni et al., 2009 for a review ). Mais les informations issues de ce type de carte restent peu précises, les stations météorologiques sont rares au Vanuatu : seulement 7 stations au total dans l'archipel, dont 2 sont localisées sur l'île d'Efate, où est située la capitale. La faible résolution des données prises en compte dans les calculs explique la faible résolution des résultats. Ainsi, les courbes de précipitations minimales et de températures maximales indiquent peu de variations, les informations que j'ai pu obtenir sur ces paramètres sont similaires d'un taxon à un autre. Il est, de plus, impossible de distinguer dans les graphiques une modification liée à l'humidité édaphique ou climatique, et le marais d'Emaotfer constitue une zone refuge où les taxons exigeants en humidité peuvent persister malgré une période sèche. Ainsi, la présence, même en faible proportion, de la forêt tropicale humide dans pratiquement tout l'enregistrement pollinique est probablement à l'origine des faibles variations de précipitations minimales observées.

Cependant, ces calculs ont pu être réalisés et pourront être à nouveau employés lorsque des données météorologiques plus précises seront disponibles. Les résultats obtenus nous ont apportés des informations qui n'auraient pas pu être obtenues avec les diagrammes polliniques uniquement, en particulier sur la variabilité climatique et sur l'impact du Kuwae.

### 2.1.2. Cas du lac Otas

Nous avons choisi de présenter dans cette partie un extrait du diagramme pollinique issu du chapitre Résultats en regroupant les taxons côtiers et de mangrove, afin de pouvoir associer des changements de végétation à des modifications de la ligne de rivage (figure 8).

La difficulté lors de cette interprétation a été de distinguer l'influence du climat de celle des variations du niveau de la mer sur la flore d'Otas. La forêt secondaire est bien représentée tout au long de la carotte, surtout lorsque les taxons côtiers sont dominants, et illustre l'impact de la lagune et de la présence d'eau salée/saumâtre sur la végétation. La matière organique, transportée par le ruissellement, se dépose dans l'étendue d'eau (lac ou lagune selon les périodes) quand le cordon littoral s'est fermé temporairement et limite les entrées de la mer dans cette étendue. Lorsque les taxons côtiers sont très présents, et indiquent donc une forte influence de l'océan sur le site, nous pouvons supposer que la connexion avec le milieu marin existe toujours malgré le comblement du cordon littoral. À ces périodes, la végétation qui n'est pas adaptée aux conditions environnementales liées aux zones littorales se dégrade et la flore supportant les embruns et les sols sableux est favorisée.

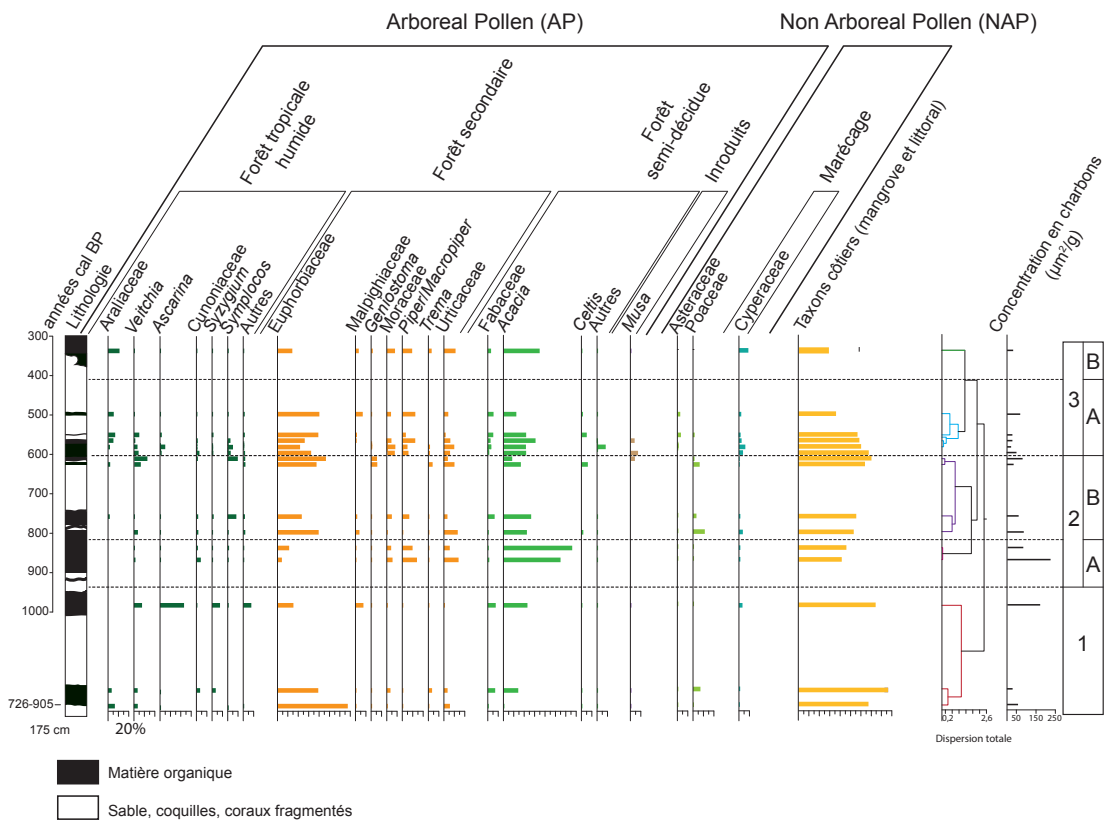


Figure 8 : Extrait du diagramme présenté dans le point 2.3. du chapitre Résultats. Les taxons côtiers (mangrove et littoral) ont été regroupés en un seul spectre pollinique

En revanche, la présence constante de taxons du littoral, de foraminifères planctoniques de faible profondeur (voir point 1.2.1) et l'altitude actuelle du lac Otas (+2 m) nous indique une faible variation de la ligne de rivage au cours du dernier millénaire. Le niveau piézométrique autour du lac est sans doute très influencé par le niveau marin, et il est probablement resté stable tout au long de cette période.

Dans les zones 1, 2B (les deux derniers échantillons) et 3A (le premier échantillon), où les taxons du littoral et de la forêt secondaire (particulièrement les Euphorbiaceae, les Urticaceae et *Trema*) sont bien représentés, il est probable que la végétation soit majoritairement marquée par l'influence de la mer, donc par un phénomène local et non régional comme le climat.

Dans la zone 2A, une progression des taxons de forêt semi-décidue et une augmentation de la concentration en micro-charbons sont observées et illustrent un milieu plutôt sec. La zone 2B, à partir de 800 ans cal BP, est marquée par une diversification des taxons de la forêt tropicale humide et un recul de la forêt semi-décidue, et témoigne de conditions plus humides. Nous remarquons que la végétation du lac Otas illustre un environnement plus varié que celui enregistré par la flore du marais d'Ematfer à la même période. D'après l'ACP, la proximité de la mer est un facteur plus important de modifications du paysage que les conditions climatiques. Ainsi, même si l'influence de l'océan diminue et que les précipitations sont conséquentes, le développement de la forêt tropicale humide nécessitera plusieurs dizaines voire centaines d'années, lorsque l'environnement sera moins marqué par les conditions littorales. La progression de taxons exigeants en humidité seulement après 800 ans cal BP peut donc être expliquée par cette inertie de la végétation. Jusqu'à 700 ans cal BP, les événements La Niña plus forts et plus fréquents (Cobb et al., 2003 ; Khider et al., 2011 ; Mohtadia et al., 2007 ; Rein et al., 2004 ; Wirrmann et al., 2006, 2011b) sont probablement à l'origine de ce paysage. Il est difficile de comparer nos données polliniques avec les résultats des autres îles du sud-ouest Pacifique, les activités humaines ayant bouleversé la flore dans cette région depuis au moins les 1500 dernières années (eg. Cabioch et al., 2008 ; Carson, 2008 ; Dotte-Sarout, 2015 ; Fall et al., 2010 for a review).

À partir de 600 ans cal BP et jusqu'à la fin de la carotte, alors que l'eau douce remplace peu à peu l'eau saumâtre et que la lagune évolue en un lac, la forêt tropicale humide régresse et s'appauvrit. Elle est remplacée par les Fabaceae et *Acacia*, qui

témoignent de conditions environnementales plus sèches. Ces résultats sont similaires à ceux issus du marais d'Emaotfer, et confirment l'influence d'un phénomène régional sur la végétation. La période sèche enregistrée par la végétation du lac Otas et du marais d'Emaotfer, datée entre 600 et 300 ans cal BP, appuie les données paléoclimatiques (analyses isotopiques sur des coraux et des spéléothèmes) qui révèlent une amplification des événements El Niño entre 750 et 200 ans BP, correspondant à la période du Petit Âge Glaciaire (Khider et al., 2011 ; Mann et al., 2009 ; Matthey et al., 2011 ; Partin et al., 2013).

La quantification climatique n'a malheureusement pas été possible sur les données palynologiques du lac Otas. La résolution de l'enregistrement pour un millénaire est trop petite, la diversité des taxons dans les échantillons (sans prendre en compte la végétation côtière) n'est pas suffisante pour obtenir des résultats statistiquement fiables et surtout, les changements de paysage sont en majorité influencés par la proximité de la mer. Ces quantifications seraient donc inexploitable et ne nous permettraient pas de reconstituer les températures et précipitations passées.

## 2.2. Impact des activités humaines sur la diversité végétale du Vanuatu

### 2.2.1. Une population Lapita navigatrice

Dans notre cas, l'impact des populations Lapita sur la végétation ne peut être déterminée que par l'enregistrement du marais d'Emaotfer. Nous avons pu observer que les données palynologiques, sédimentologiques, de micro-faune et les quantifications climatiques (bien que nous devons les prendre en compte avec prudence) favorisent l'hypothèse d'un impact climatique plutôt qu'humain sur le paysage entre 3000 et 1300 ans cal BP.

Le site archéologique de Teouma, localisé à proximité du marais, est composé de plusieurs zones, correspondant à des cultures différentes (figure 9), et le cimetière est daté de la période Lapita (voir le point 2.1. du chapitre Cadre de l'étude pour plus de détail). Sa première fonction était à vocation funéraire, mais une couche de 50 cm d'épaisseur contenant des déchets domestiques (os, restes végétaux, ou coquilles par exemple) est contemporaine du cimetière, et témoigne d'une occupation par les populations de culture Lapita (Bedford et al., 2006).



De nombreuses analyses isotopiques ont été réalisées sur les ossements (humains et d'animaux) retrouvés à Teouma et ailleurs dans l'archipel du Vanuatu. Ces études ont révélé que le régime alimentaire des populations Lapita était mixte, basé sur des ressources issues de la pêche et de la cueillette, une faible activité horticole et le contrôle de quelques animaux, comme le cochon ou le poulet (Bedford et al, 2011 ; Bentley et al., 2007 ; Kinaston et al., 2014a, 2014b ; Valentin et al., 2010b, 2014).

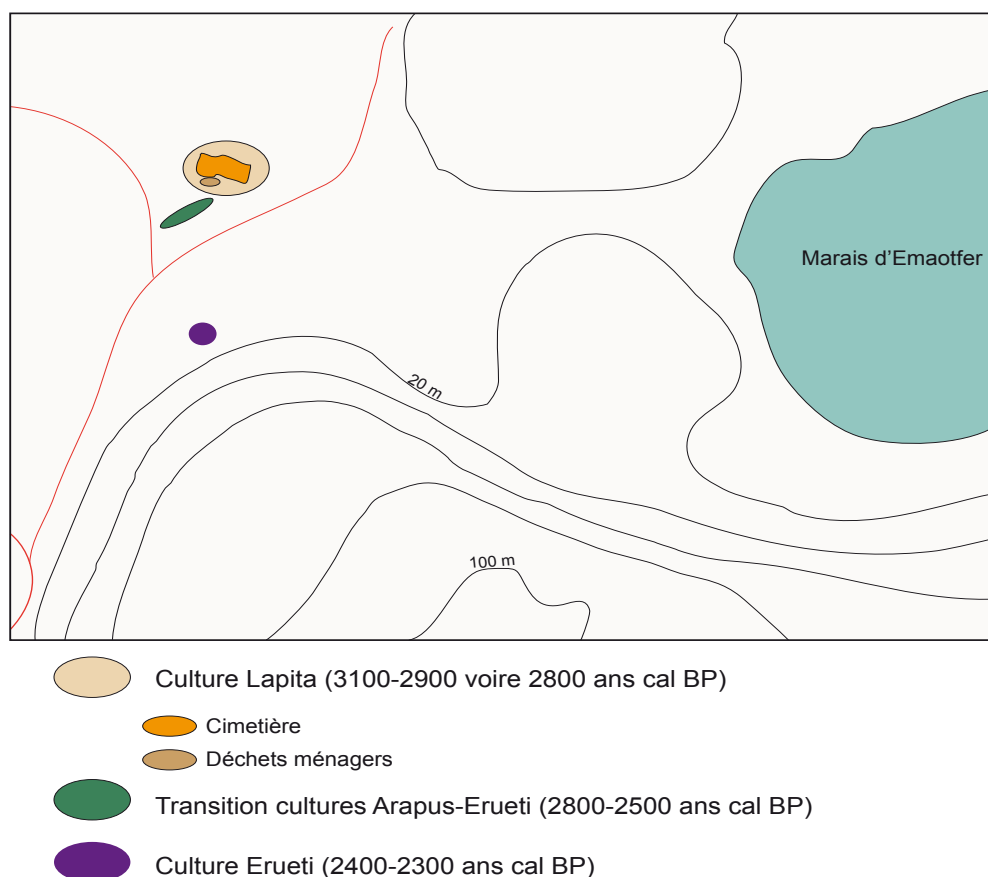


Figure 9 : Carte du site de Teouma, représentant les zones fouillées et la culture correspondante. D'après Valentin et al., 2014

La faible présence de l'horticulture lors de la période Lapita peut s'expliquer par le temps nécessaire aux plantes cultivées, introduites par les premiers colons, pour qu'elles puissent fournir suffisamment de nourriture à toute une communauté (Walter et al., 2003). À Teouma, les habitants ont souffert de diverses pathologies, comme une carence en vitamine C, des dislocations répétées des articulations ou de l'arthrite

(Buckley, 2007 ; Buckley et al., 2014 ; Foster et al., 2015). Ce stress est associé, d'après les auteurs, à l'installation dans un nouvel environnement, à la forte consommation de protéines et de peu de végétaux. Le régime alimentaire, tel qu'il est reconstitué par les analyses isotopiques, est similaire pour les hommes et les femmes de Teouma (les différences seraient plutôt liées à la hiérarchie), la survie sur une île inconnue passerait avant les distinctions de genre (Foster et al., 2015). Cette période de transition alimentaire explique l'absence de trace de l'influence humaine sur la végétation autour du marais d'Emaotfer entre 3100 et 2800 ans cal BP.

Les références que nous allons employer dans ce point, le suivant et la partie 3 concernent majoritairement le Vanuatu, la Nouvelle-Calédonie, les Fiji et l'ouest de la Polynésie (Tonga et Samoa), tous étant des territoires vierges avant l'arrivée des populations Lapita, entre 3200 et 2900 ans BP. Même si ces navigateurs sont originaires des îles Bismarck (Papouasie-Nouvelle-Guinée) et que des sites archéologiques Lapita ont été découverts dans les îles Salomon, ces archipels étaient déjà habités avant 3200 ans BP. L'histoire de l'impact anthropique est différente entre ces îles de l'Océanie Proche (Bismarck et Salomon) et de l'Océanie Lointaine (Vanuatu, Nouvelle-Calédonie, Fiji, Tonga, Samoa), et donc difficilement comparable (Summerhayes et al., 2009). De la même manière, la région située à l'ouest des Tonga à été colonisée bien plus tard (à partir de 1600 ans BP), et la population de Micronésie possède des origines asiatiques (Philippines), mélanésiennes (Lapita) et polynésiennes (Garanger, 1982 ; Intoh, 1999). Peu d'études palynologiques existent au Vanuatu, et les enregistrements sont rarement continus (Hope et al., 1999 for a review), mais des traces d'horticulture (bananiers et Aracées) sont visibles dès la période Lapita, grâce aux analyses des phytolithes et des grains d'amidon (Horrocks et Bedford, 2005 ; Horrocks et Nunn, 2007 ; Horrocks et al., 2009). L'horticulture se développe néanmoins de façon significative au cours de la période post-Lapita. En Nouvelle-Calédonie, l'influence des activités humaines est notée dans les diagrammes polliniques dès les premiers peuplements, vers 3000 ans cal BP, par une augmentation des charbons et des taxons de végétation secondaires (Stevenson et al., 2001 ; Stevenson, 2004). Cependant, les modifications importantes du paysage se sont majoritairement produites à partir de 1500 ans cal BP (Carson, 2008 ; Wirmann et al., 2011b, voir point 2.2.2.). Des observations similaires sont obtenues pour l'archipel des Fiji (Hope et al., 2009 for a review). L'augmentation des concentration en micro-

charbons et de l'érosion, notées dans les Tonga à partir de 2900 ans cal BP, sont associées à l'arrivée de l'Homme (Fall, 2005, 2010 for a review).

Ainsi, l'impact anthropique sur la végétation n'est pas un processus homogène lors de la période Lapita, un grand nombre de comportements de subsistances différents ont coexisté. Ces résultats sont contradictoires avec le fait que la culture Lapita soit commune à l'ensemble des navigateurs partis des îles Bismarck vers les Tonga entre 3200 et 2900 ans BP. Chaque groupe s'est très probablement adapté au site (géomorphologie, emplacement et climat) où il s'est installé, développant ou non l'horticulture. À Teouma, le climat plus sec a permis une ouverture de la végétation, et une population a pu s'installer sans avoir un réel besoin de modifier son nouvel environnement. De plus, les populations Lapita ont pu transformer le territoire autour du marais d'Emaotfer sans pour autant que ces modifications soient enregistrés par le diagramme pollinique et celui des feux. Nous pouvons évoquer par exemple le cas de la cueillette, ou celui de l'aménagement de la forêt, afin de protéger et utiliser la flore se développant naturellement à Efate. D'autres pistes sont donc à explorer à partir de ces propositions, notamment grâce à l'étude de macrorestes végétaux (feuilles, graines, bois) présents près du marais d'Emaotfer ou au niveau du cimetière de Teouma.

Le lieu, facilement accessible par la mer mais exposé au vent et aux embruns, n'était sans doute pas envisagé par les migrants pour une installation à long terme. La plupart des sites archéologiques post-Lapita fouillés à Efate sont par ailleurs localisés sur la côte ouest, plus abritée du vent.

L'introduction d'animaux comme le cochon, le poulet, le chien et le rat (introduit involontairement) ont probablement eu un impact sur la population autochtone animale. Ces événements ont augmenté la pression écologique sur les écosystèmes insulaires, à l'origine d'un rapide appauvrissement, voire d'une disparition de plusieurs espèces dans cette région du Pacifique au moment de l'arrivée des premiers navigateurs (Allen, 2003, 2007 ; Anderson, 2002, 2003, 2008 ; Prebble et Wilmshurst, 2009 ; Storey et al., 2008). Bien que l'impact anthropique sur la faune soit plus net que sur la flore dès la période Lapita, déterminer l'origine (naturelle ou humaine) d'une disparition ou du déclin d'une espèce animale reste complexe, comme c'est le cas pour l'extinction du bœufier *Hippopus hippopus* dans l'archipel des Fiji (Clark et Anderson, 2009 for a review, Seeto et al., 2012).

### 2.2.2. Des populations post-Lapita sédentaires

Dans la figure 9, nous pouvons voir que des zones plus récentes que le cimetière composent le site de Teouma, et illustrent la présence de l'Homme entre 2800 et 2300 ans cal BP. Les niveaux datés de la transition Arapus-Erueti (2800-2500 ans cal BP) sont constitués de déchets domestiques et indiquent un territoire habité pendant cette période. À l'inverse, les niveaux datés de la culture Erueti (2400-2300 ans cal BP) ne présentent que des sépultures et aucune trace d'installation. Lors de la transition Arapus-Erueti, l'horticulture devait donc être peu (voire pas) développée par les populations de Teouma, alors que l'absence d'habitation pendant la période Erueti peut expliquer le très faible impact anthropique sur la végétation autour du marais d'Emaotfer entre 2400 et 2300 ans cal BP. Les analyses isotopiques réalisées par Valentin et al. (2011, 2014) indiquent que les populations de culture Erueti consomment plus de végétaux que celles de culture Lapita. Le site de Teouma n'était probablement pas privilégié pour l'horticulture entre 2400 et 2300 ans cal BP, peut être en raison des conditions environnementales sèches que nous avons déterminées à cette période.

La différence de régime alimentaire entre culture Lapita et post-Lapita observée à Teouma est aussi notée dans d'autres îles de l'archipel du Vanuatu et aux Fiji (Field et al., 2009 ; Jones et Kinn, 2009 ; Kinaston et Buckley, 2013 for a review ; Kinaston et al., 2014a ; Valentin et al., 2006). Cette modification est progressive, le régime alimentaire est majoritairement constitué de ressources terrestres depuis uniquement les deux derniers millénaires (Denham et Haberle, 2008).

À partir de 1500-1300 ans cal BP, l'impact anthropique, caractérisé par la présence des taxons introduits à Emaotfer, commence à marquer la dynamique de la végétation autour du marais d'Emaotfer, jusqu'à devenir le principal facteur à l'origine des modifications du paysage. Une augmentation des feux (figure 10) est observée entre 1500-1300 ans cal BP. Le développement de la tourbe favorisant plus de biomasse (de combustible), la hausse de la concentration en micro-charbons peut donc être d'origine naturelle. Mais ce premier pic d'incendie coïncide aussi avec le début de la progression des taxons introduits, les activités humaines ne sont donc pas exclues. Le deuxième pic de feux (1100-950 ans cal BP) est synchronique du développement maximum des plantes introduites, et la diminution de la concentration en charbons se produit au moment de la surabondance de *Piper/Macropiper* et de la présence de *Piper*

*methysticum*. Le rapport W/L (<0,5) illustre un combustible composé en majorité d'herbacées pendant les 1500 dernières années.

Distinguer les feux d'origine naturelle et ceux d'origine anthropique reste un exercice difficile, et il nous est impossible, dans un enregistrement, de déterminer les différentes phases constituant l'agriculture sur brûlis (Conodera et al., 2009). Mais nous avons pu noter que les feux sur les îles du sud-ouest Pacifique sont des événements majoritairement liés aux activités humaines (Spriggs, 2010 for a review), et les pics de concentration en micro-charbons observés dans la carotte Tfer06 sont contemporains d'une période plus humide. L'association des taxons introduits, en particulier *Musa* (le bananier) et des périodes d'incendies peut donc être défini comme représentant une agriculture sur brûlis.

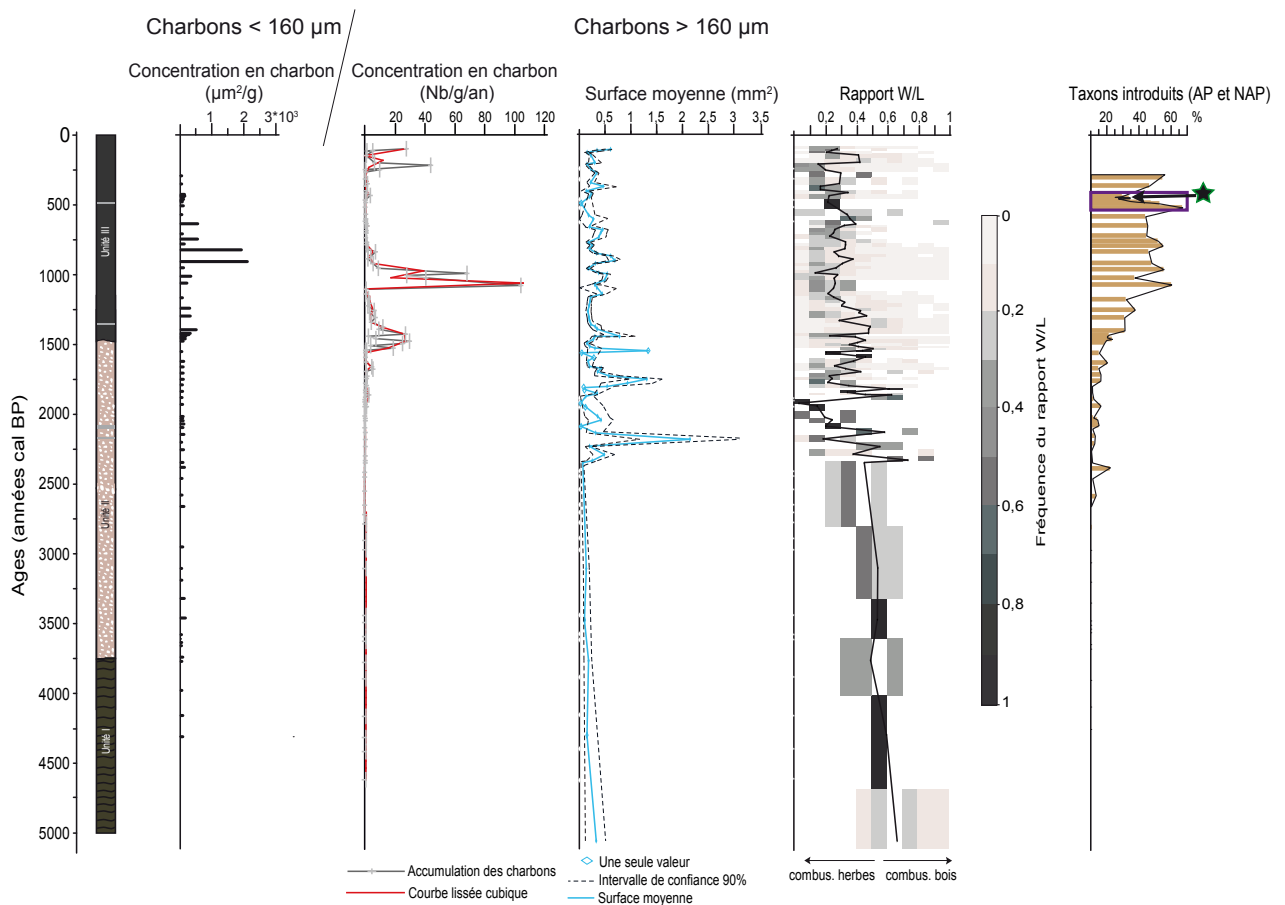


Figure 10 : Courbes de la concentration en charbons et des taxons introduits de la carotte Tfer06. Le rectangle signale la période de surabondance de *Piper* et *Macropiper*, l'étoile la zone contenant des grains de *P. methysticum*

Le développement du bananier nécessite un climat humide (il ne supporte pas un mois sans pluie), un sol bien drainé et une luminosité importante (Mémento de l'agronome – collectif CIRAD, 2002). L'augmentation des précipitations dès 1950 ans cal BP (voir point 2.1.1.) a pu faciliter la mise en place d'une horticulture à long terme, comme Valentin et al. (2014) l'ont proposé à partir d'analyses isotopiques sur des ossements humains de Teouma. L'agriculture sur brûlis, encore très répandue à l'heure actuelle au Vanuatu (Blanco et al., 2013), et le besoin d'une luminosité conséquente pour le bananier expliquent la fréquence des feux lors du dernier millénaire à Emaotfer. *Phyla*, une autre plante introduite utilisée en médecine (Sharma et Singh, 2013) et fréquemment associée dans le diagramme pollinique à *Musa* (le bananier), ne présente pas d'exigences écologiques particulières, et supporte les milieux dégradés par l'Homme ou par un événement naturel (Dellow et al., 2001 ; Lucy et al., 1995). Les fortes proportions de *Phyla* sont aussi à relier à son potentiel invasif. L'abondance des feux témoignerait de l'importance et de la proximité (moins de 15 km) de l'installation humaine du marais d'Emaotfer (Whitlock, 2010). Les incendies reconstitués par les micro-charbons indiquent une biomasse en majorité composée d'herbacées, et témoignent d'un paysage ouvert. Mais une étude anthropologique réalisée en Australie a révélé une tendance de l'Homme à choisir des herbacées comme combustible, celles-ci assureraient un meilleur rendement que le bois (Byrne et al., 2013). Le pourcentage notable d'herbes dans la biomasse brûlée est sans doute en lien avec les activités humaines.

Les feux sont en revanche pratiquement absents au moment de la surabondance de *Piper/Macropiper* et de la présence de *Piper methysticum* (Piperaceae). Les tubercules de la plante *P. methysticum*, cultivar vraisemblablement originaire du Vanuatu, sont utilisés dans la préparation d'une boisson rituelle appelée kava, possédant des effets anesthésiques, relaxants et antidépresseurs (Lebot et Cabalion, 1986). Ces propriétés se retrouvent chez la plupart des espèces de *Piper* et de *Macropiper* (C. Sam, pers. com.), et peuvent être utilisée par la population à la place du kava, mais *P. methysticum* représente l'espèce domestiquée au Vanuatu. À l'état naturel, ces genres se développent dans les sous-bois, souvent près des plans d'eau. Leur croissance nécessitant des sols bien drainés, une humidité locale importante et de l'ombre (Lebot et Cabalion, 1986), nous pouvons supposer que ces taxons ont été cultivés au niveau du sous-bois entourant le marais. De plus, la surabondance des grains de pollen de *Piper* et *Macropiper*, qui se

dispersent sur une faible distance, et la présence de *P. methysticum*, dont les fleurs mâles sont plutôt rares (Gardner, 1997 ; Kikuchi et al., 2007 ; Lebot et Cabalion, 1986), favorisent notre hypothèse.

Si la disparition de plusieurs espèces animales coïncide avec la date des premières installations humaines, les changements de paysages se sont surtout produits pendant la période post-Lapita. Comme bon nombre d'analyses palynologiques, de charbons et sédimentologiques, notre étude ne montre pas une amplification de l'impact avant 1500-1300 ans cal BP. Certains sites sur les îles du sud-ouest Pacifique témoignent d'une influence plus ancienne des activités humaines sur la végétation, vers 2200 ans cal BP (Hope et al., 2009 for a review). Cependant, la plupart des modifications du paysage interprétées comme révélant un impact anthropique sont datées à partir de 1500 ans cal BP (Dotte-Sarout et al., 2010 ; Pearl, 2006 ; Wirrmann et al., 2011b). En Nouvelle-Calédonie, l'agriculture sur brûlis est bien développée à la fin du premier millénaire, mais un changement de l'organisation spatiale (habitations, sites d'horticultures, type de plantes cultivées) est observé vers 550 ans BP (1400 AD), et est associé à une modification des conditions climatiques (Dotte-Sarout et al., 2010). La surabondance des *Piper* et *Macropiper* et la diminution de la concentration en micro-charbons que nous avons observées datent de la même période. Un environnement plus sec, peut être sous l'influence d'El Niño plus fréquents, et enregistré au marais d'Emaotfer comme au lac Otas, va marquer les stratégies d'aménagement du territoire : les feux sont par exemple moins nécessaires et surtout plus difficilement maîtrisables, ils peuvent donc être moins favorisés par la population. Dans le cas d'Efate et des îles alentour, l'arrivée des polynésiens, en particulier de Roy Mata vers 1450 AD, va permettre la restructuration des sociétés de cette région (Ballard et al., 2008 ; Coiffier, 2009 ; Garanger, 1972), et peut être contribuer à la diversification des plantes cultivées à Emaotfer, dont les Piperaceae. La proportion des *Macropiper* et des *Piper* décline brusquement entre 440 et 370 ans cal BP. La consommation de kava a été interdite par les missionnaires anglais et français vers le 19<sup>ème</sup> siècle (150 ans BP – Van Trease, 1995), et donc n'est pas à l'origine de la chute que nous observons. Nous n'avons pas relevé de changements climatiques à cette période et l'éruption du Kuwae se produit avant 440 ans cal BP. Cette dynamique de végétation pourrait illustrer une baisse de la fréquentation du site d'Emaotfer.

Au Vanuatu, très peu de données archéologiques datées entre 2000 et 600 ans cal BP existent : seul le site de Mangaasi documente la période 2000-1200, et l'époque 1200-600 ans cal BP est très peu connue du fait de la difficulté à identifier les sites sans poteries (Bedford et Spriggs, 2014 for a review ; Siméoni, 2009 for a review). Notre étude apporte ainsi des informations sur cette période peu documentée. À partir de 1500 ans cal BP, nous pouvons observer l'installation d'une population plus sédentaire que celle de culture Lapita autour du marais d'Emaotfer. Elle est capable de modifier son environnement et d'adapter son type d'agriculture selon le climat et la géomorphologie du site. La forte présence des feux autour du marais d'Emaotfer, facteur important de modification du paysage (Bowman et Haberle, 2010), a probablement favorisé l'ouverture de la végétation. Avant l'arrivée des européens, le site d'Emaotfer est donc probablement composé de nombreux jardins. Cependant, il serait trop simpliste de définir l'impact anthropique autour du marais d'Emaotfer comme la culture de plantes introduites. En plus du défrichage, les feux peuvent être utilisés par l'Homme comme combustible, pour cuire les aliments et chauffer. L'établissement d'habitations sur un site demande une ouverture de la végétation, pouvant être provoquée par des incendies. Enfin, une diminution des AP dans le diagramme pollinique peut être associée à exploitation du bois pour la construction d'habitations ou pour la création de nouvelles embarcations.

Malgré la diversité des cultures post-Lapita, nous pouvons remarquer que les modifications des comportements des populations sont pratiquement synchrones d'un archipel à un autre. L'environnement peut à son tour influencer les activités humaines. Nous avons peu abordé le sujet dans ce point, il sera développé dans la partie 3.

La présence de l'Homme au lac Otas est très peu marquée, seuls trois échantillons datés vers 600 ans cal BP enregistrent un petit développement du genre *Musa*. Il peut s'agir d'un signal parasite, provenant d'une culture éloignée du lac, ou d'une installation avortée. *Musa* apparaît au moment de la première introduction importante d'eau douce dans la lagune et disparaît avec le niveau sableux suivant. Un groupe a peut être tenté de s'installer, mais a abandonné le site lorsque la mer est revenue au niveau de l'actuel lac Otas.

### 3. Migrations et adaptation des populations porteuses des cultures Lapita et Post-Lapita



### 3.1. Conséquences du climat sur les déplacements de populations de la période Lapita

Les voyages vers l'Océanie Lointaine n'ont probablement pas été réalisés d'un seul trait, mais plutôt par un grand nombre d'allers et retours. Les îles localisées à l'est des Salomon ne sont pas visibles depuis cet archipel, les traversées étaient donc de véritables expéditions vers l'inconnu. Il est supposé qu'un ou plusieurs groupes partaient explorer la région, et lorsqu'une région était découverte, d'autres excursions se succédaient : tout d'abord pour accumuler des données de navigation (vents, positions des étoiles et du soleil), puis pour amener les animaux et les plantes nécessaires au développement d'une communauté sur ce nouveau territoire (Irwin, 2008 for a review). Les navigateurs ont donc expérimenté plusieurs routes possibles avant d'entreprendre un voyage, avec leur famille, de plus de 300 km.

Anderson et al. (2006) ont proposé un départ préférentiel des populations de la Papouasie Nouvelle-Guinée vers l'est en période El Niño, car les alizés (vents d'est) deviennent faibles voire inexistants. La navigation à voile serait donc facilitée à cette époque. La zone située au sud-est de la Papouasie Nouvelle-Guinée a été vraisemblablement privilégiée par les populations Lapita, le trajet retour se faisant alors avec les alizés dans le dos (Anderson, 2003). Enfin, il y aurait eu un choix dans les îles colonisées en Océanie Lointaine (périodes Lapita et post-Lapita) : certaines ont pu être employées comme des zones d'installations permanentes, et d'autres comme des lieux d'escales ou des réserves de faune (installation saisonnière - Anderson 2000 ; Di Piazza and Pearthree, 2001). Ce choix dépendrait de la facilité d'accès au site (zone au vent/sous le vent) et de la période la plus propice pour y aller (été/hiver, mousson, événement El Niño ou La Niña).

La compilation des données archéologiques et géologiques a montré que les premières installations humaines à l'est des îles Salomon comme dans les Mariannes se sont produites après un abaissement du niveau de la mer. (Bedford et al., 2006 ; Carson, 2011, 2014 ; Clark et Anderson, 2009 for a review ; Irwin, 1992). Il a été proposé que le recul de l'océan avant 3000 ans BP, en émergeant une partie des récifs coralliens situés dans des zones très peu profondes (ne permettant pas la navigation), aurait rendu les îles plus facilement accessibles, et aurait permis d'étendre les plaines littorales, multipliant les potentiels sites d'installation humaine. Les changements de niveau marin

favorisent donc la colonisation d'une île, mais n'expliquent pas le déplacement jusqu'à celle-ci (Irwin, 2008 for a review).

Le climat est un élément à prendre en compte dans l'étude des migrations océaniques, mais il n'est pas le seul. Des facteurs locaux, comme le type de milieu où sont installées les populations (composition du sol, région sèche ou forte saisonnalité climatique), les éruptions volcaniques ou les phénomènes de moussons (Forestier et Guillaud, 2005 ; Fitzpatrick et Callaghan, 2013 ; Specht, 2007 for a review), possèdent des effets, qui ne sont sans doute pas négligeables, sur les déplacements originaires de Papouasie Nouvelle-Guinée. Mais il reste plus difficile d'intégrer ces événements que des conditions environnementales régionales dans les modèles de migrations (McLeman, 2012 for a review).

D'autres hypothèses, non développées dans cette thèse puisque ne relevant pas de phénomènes naturels, prennent en compte l'impact d'une augmentation démographique en Papouasie Nouvelle-Guinée (Bellwood, 2011), ou les connaissances en navigation (Clark et Anderson, 2009 ; Di Piazza et al., 2007). Ainsi, les populations Lapita ont atteint les archipels des Fiji, des Tonga et des Samoa plusieurs centaines d'années (2900 ans BP) après le Vanuatu et la Nouvelle-Calédonie (3200-3000 ans BP). La distance à parcourir entre les Fiji et le Vanuatu est en effet plus grande qu'entre les Salomon et le Vanuatu, et demanderait donc des embarcations avec une technologie plus complexe. Cette hypothèse explique en partie l'arrêt de l'expansion Lapita aux îles Tonga/Samoa, et la reprise de la traversée du Pacifique est vers 2100 ans BP. Mais il est important de noter que le manque de matière argileuse à l'est des Samoa, indispensable à la fabrication de la poterie Lapita, pourrait expliquer l'absence (ou la non visibilité) de cette culture.

Nous avons pu constater qu'un grand nombre d'évènements peuvent influencer les migrations austronésiennes, néanmoins l'interruption des déplacements vers l'Océanie entre 40,000 et 3500 ans BP reste toujours un sujet débattu. Les premières populations qui atteignent Teouma sont arrivées avec des conditions climatiques relativement sèches, sous l'influence d'évènements El Niño fréquents et marqués. Nos résultats confirment l'hypothèse climatique d'Anderson et al. (2006). En comparant nos résultats avec la littérature exposée ci-dessus, nous pouvons en déduire que des migrations vers

l'Océanie Lointaine étaient organisées en période El Niño, à partir de 3700-3500 ans BP, lorsque les vents d'est faiblissaient, et que les groupes partis revenaient à leur point de départ lorsque les alizés s'amplifiaient. La durée d'un El Niño actuel est en moyenne de 1 à 2 ans, et les voyages en période Lapita ne devaient pas dépasser un mois (Irwin, 2008 for a review), une hausse de la fréquence d'évènements El Niño augmenterait donc le nombre d'opportunité de départ vers l'est. L'hypothèse de l'influence du climat sur les migrations océaniques peut en revanche sous-estimer les capacités de navigation des populations Lapita, et de telles compétences restent difficiles à connaître.

### 3.2. Adaptations à des îles vierges et aménagements du territoire

Le marais d'Emaotfer, sur la côte sud d'Efate, est propice aux installations humaines, comme témoignent les nombreux sites archéologiques, datés de la période Lapita et post-Lapita. La présence de taxons introduits, observée depuis 1500 ans cal BP, indique que le lieu est aussi favorable à l'horticulture. Le marais ne s'est jamais asséché au cours de l'Holocène supérieur (voir point 1.1.2.), même si le niveau d'eau est devenu faible entre 2500 et 2000 ans cal BP, lorsque que les précipitations ont fortement diminué. Le choix de cet endroit pour l'implantation des communautés n'est probablement pas opportuniste mais délibéré. La présence d'un plan d'eau facilite en effet la mise en place des activités humaines : il est possible d'utiliser l'eau pour boire, de pêcher, l'humidité locale favorise le développement de la végétation (donc de combustible disponible) et permet la culture de plantes introduites exigeantes en eau comme *Musa* (Dotte-Sarout, 2010 ; Picornell Gelabert et al., 2011).

À l'inverse, au vu de l'absence de site archéologique et de la faible présence de taxons introduits, le lac Otas, sur la pointe est d'Efate, semble un endroit défavorable à une installation humaine. La présence de la mer et les forts alizés sont à l'origine d'un environnement plutôt sec et d'eaux souterraines saumâtres. L'horticulture est donc difficilement envisageable dans de telles conditions. La mangrove peut fournir suffisamment de ressources pour subvenir aux besoins d'un groupe installé en bord de mer (mollusques, crustacées, poissons et bois pour le feu – Tomlinson, 1994). Des analyses archéologiques, palynologiques et de micro-charbons ont montré un impact du recul de la mangrove sur les comportements humains, illustré par une modification du régime alimentaire des populations ou un changement de territoire (Amesbury, 2007 ;

Moss et al., 2015). La géomorphologie du littoral et l'absence de mangrove rendent le lac Otas peu accueillant pour l'Homme, en revanche, la présence de forts alizés facilite l'accès au site en pirogue à voile. Cela peut expliquer les résultats ethnographiques, indiquant l'arrivée de Roy Mata sur cette pointe (Guiart, 1973), alors que tous les sites associés à cette époque sont localisés sur la côte ouest, plus abritée (Ballard et al., 2008 ; Coiffier, 2009 ; Garanger, 1972).

La comparaison du marais d'Emaotfer et du lac Otas montre l'influence de l'environnement local sur l'installation des populations. Il y a eu un choix, lors de la colonisation d'un site, de s'installer (à court ou à long terme), ou de changer d'endroit, selon le climat et la géomorphologie du lieu que le groupe de navigateurs venait d'atteindre.

Une fois que la population s'est installée sur un site, elle commence à modifier son environnement selon ses besoins. Nous avons pu voir que le régime alimentaire des individus à la période Lapita est mixte, basé sur des ressources marines comme terrestres ; tandis que les comportements de subsistance des sociétés post-Lapita intègrent plus de protéines végétales terrestres (Bedford et al., 2011 ; Bentley et al., 2007 ; Field et al., 2009 ; Kinaston et al., 2014a, 2014b ; Valentin et al., 2010b, 2014). Les populations Lapita sont composées de navigateurs, nomades, qui ne s'établissent pas longtemps au même endroit, et donc développent peu leur activité horticole. D'autre part, les études archéologiques de la période Lapita illustrent une occupation des sites d'habitation sur une courte période de temps (Bedford, 2006b). Le milieu littoral, exposé au vent (lieu facilement accessible en pirogue à voile), n'est pas adapté à une installation à long terme et à un aménagement du territoire (voir le cas du lac Otas exposé plus haut). Les populations post-Lapita, plus sédentaires, vont s'éloigner du bord de mer et progressivement mettre en place des structures horticoles, à partir de 2000 ans BP (Denham et Haberle, 2008).

Autour du marais d'Emaotfer, les sites archéologiques et notre étude palynologique témoignent de la présence de l'Homme entre 3000 et 2300 ans cal BP, et à partir de 1500 ans cal BP jusqu'à aujourd'hui. Il nous est difficile de savoir si le site a été abandonné entre 2300 et 1500 ans cal BP, ou si un groupe est resté sans pour autant favoriser l'horticulture de façon plus importante que ces prédécesseurs. Après 1500 ans cal BP, des conditions climatiques humides sont contemporaines d'un développement de

plantes introduites. Majoritairement, les taxons apportés par les colons Lapita en Océanie Lointaine sont originaires de Papouasie Nouvelle-Guinée ou d'Asie du sud-est (Kennedy, 2008 ; Lebot et Cabalion, 1986 ; Simmonds, 1959 ; Walter et al., 2003). Nous avons pu remarquer que *Musa* (le bananier) et les *Piper/Macropiper* associés à la culture du kava (zone pollinique caractérisée par la surabondance en grains de pollen) sont adaptés aux conditions environnementales du marais d'Emaotfer, humides et influencées par l'Homme (voir point 2.2.2). D'autres plantes introduites tiennent une part importante dans l'alimentation des populations océaniques : *Artocarpus* (l'arbre à pain), *Colocasia* (le taro) et *Dioscorea* (l'igname). Les genres *Artocarpus* et *Dioscorea* se développent dans un milieu sec et ouvert (Walter et al., 2003), ne correspondant pas à celui du marais. *Colocasia*, en revanche, a besoin de conditions humides pour progresser, mais il n'a pas non plus été observé dans nos enregistrements. La culture de *Colocasia* est réalisée dans des jardins irrigués (tarodières), ou sur des terrasses de la côte est, exposée au vent (Walter et al., 2003). L'environnement autour du marais n'est donc pas totalement propice à la culture de *Colocasia*, et les tarodières demandant une organisation sophistiquée du paysage, il s'agit peut être d'un choix des populations de favoriser des plantations de *Musa* plutôt que de *Colocasia*. Nous avons également vu dans le point 1.3. du chapitre Résultats que la pluie pollinique qui atteint le marais d'Emaotfer est issue d'une végétation située dans un périmètre assez restreint autour du plan d'eau. Il est probable que les populations post-Lapita aient organisé leur espace, et dans ce cas, *Musa* sera effectivement cultivé près du marais, tandis que *Dioscorea* sera développé au niveau d'une zone plus sèche et *Colocasia* au niveau d'une pente soumise à des conditions locales plus humides. La courte distance d'observation offerte par le marais d'Emaotfer ne nous permet pas d'étudier à échelle régionale l'aménagement du territoire et des cultures autour du marais, et peut expliquer l'absence d'autres espèces introduites que *Musa* et *Phyllanthus* dans le diagramme pollinique.

Le développement des sociétés humaines et de leurs structures horticoles, lorsqu'elles se sédentarisent, dépend donc du climat et de l'environnement local. Cela se traduit par un grand nombre de pratiques agricoles différentes, de la forêt domestiquée à la création de jardins (Dotte-Sarout, 2015).

Nous avons majoritairement tenu compte, jusqu'à présent, de l'influence de l'environnement local sur l'installation ou l'aménagement d'un territoire par l'Homme.

Nous allons maintenant voir les possibles changements climatiques régionaux qui ont pu influencer les populations présentes en Océanie Lointaine au cours des derniers 3000 ans.

Au début du chapitre 2.1.1., nous avons exposé l'impact d'une diminution du niveau de la mer vers 4000 ans BP sur la végétation. Ce recul est associé aux surrections tectoniques des archipels situés le long de la zone de subduction Australie-Pacifique (Lecolle et al., 1990 ; Neef et Veeh, 1977) et à une baisse hydro-isostasique, liée à l'apport d'eaux froides issues de la fonte des glaciers (Dickinson, 2001, 2003). Au cours des 3000 dernières années, les forts El Niño ont favorisé des températures de surface de l'océan (SST) relativement basses (Gagan et al., 2004), amplifiant la baisse hydro-isostasique (Grinsted et al., 2010). Nunn et Carson (2015) suggèrent que cette diminution du niveau de la mer, observée dans tout le sud-ouest Pacifique, aurait impacté les civilisations océaniques jusqu'à 2500 cal ans BP. Entre 3000 et 2000 ans cal BP, l'océan a pu reculer de 0,7 m, entraînant la modification du trait de côte, de la végétation sur les rivages et de la faune marine. La diminution des ressources côtières, l'une des bases de l'alimentation des sociétés Lapita, aurait alors poussé les populations à migrer vers l'intérieur des terres, et à adapter leurs comportements de subsistance (Carson, 2008 ; Hope et al., 1999). Le marais d'Emaotfer est probablement trop loin de la côte et à trop haute altitude (15-20 m actuellement) pour enregistrer les petites variations du niveau de la mer après 2700 ans cal BP. Cependant, le site archéologique de Teouma est aujourd'hui encore situé non loin du rivage, et à seulement 5 m d'altitude. L'impact d'une baisse de l'océan de 0,7 m a pu influencer l'environnement autour de la rivière Teouma, incitant les groupes occupant l'endroit à s'installer plus loin de la côte. Cette hypothèse peut expliquer l'absence de traces d'habitation après 2500 ans cal BP (quelques sépultures datées entre 2400 et 2300 ans cal BP).

Le peuplement Lapita s'est produit en période sèche, défavorisant la culture de plantes exigeantes en humidité, comme *Musa* ou *Colocasia* (Valentin et al., 2014). Ainsi, l'installation, vers 1500-1300 ans cal BP autour du marais d'Emaotfer, d'une population sédentaire maîtrisant les techniques d'horticultures est contemporaine de conditions environnementales humides, et indique l'influence possible des changements climatiques sur les comportements humains. Ces nouveaux habitants possèdent une tradition différente des groupes qui ont précédemment occupé ce site.

Un autre événement, « the AD 1300 event », semble avoir bouleversé les sociétés océaniques (Nunn, 2005, 2012 ; Nunn et al., 2007). Selon Nunn, autour de 1300 AD (650 ans BP), au moment de la transition de l'Optimum Médiéval au Petit Âge Glaciaire, un refroidissement rapide du climat et une baisse du niveau de la mer ont forcé les populations insulaires à se réorganiser pour s'adapter à ces changements. L'auteur note, par exemple, l'utilisation préférentielle d'abris fermés (grottes) plutôt que de sites ouverts et l'arrêt des échanges de kava entre l'archipel du Vanuatu et celui des Tonga. D'autres modifications de comportements ont pu être observées, principalement autour de 500 ans BP, comme une augmentation des conflits, ou un abandon des petites îles (Cochrane et al., 2011 ; Field, 2008 ; Field et al., 2009 ; Jones et Quinn, 2009 ; Masse et al., 2006 ; Reepmeyer et Clark, 2010). Cependant, contrairement à Nunn, les auteurs que nous venons de citer ne sont pas nécessairement favorables à l'hypothèse de l'influence des changements environnementaux sur les sociétés insulaires. Les dates issues des sites archéologiques ne sont pas toujours assez précises pour être comparées à celles des événements climatiques. De plus, certains changements sociétaux (sites fortifiés, diminution des échanges entre les archipels) se sont produits bien avant ou après les variations climatiques décrites au moment de la transition l'Optimum Médiéval/Petit Âge Glaciaire. Dans notre cas, un assèchement du climat est observé à partir de 750-530 ans cal BP à Emaotfer et entre 600 et 300 ans cal BP à Otas. La surabondance des grains de pollen de *Piper/Macropiper* apparaît peu après, vers 590-540 ans cal BP, et peut donc être associé à ce changement climatique. Mais l'arrivée des polynésiens sur l'île d'Efate à cette même période est aussi à prendre en compte, et leur influence sur les habitants du marais d'Emaotfer peut masquer celle du climat.

Les importantes éruptions volcaniques, en détruisant le paysage alentour, peuvent pousser les populations à évacuer leur sites d'habitation (Bedford et Spriggs, 2014 for a review). L'île d'Efate ne compte plus de volcans actifs depuis l'Holocène inférieur, mais l'éruption catastrophique du Kuwae (1452 AD) a probablement eu un impact sur l'environnement de cette île. Néanmoins, les activités humaines sur l'île d'Efate ne semblent pas avoir été modifiées à cette période. D'après les analyses ethnographiques, les habitants de l'île d'Epi, où se trouve actuellement la caldera du Kuwae, se sont réfugiés à Efate lors de l'éruption (Garanger, 1972). La conséquence directe de cet événement sur les populations de la région d'Efate devait donc être modérée.

L'importance et la simultanéité des migrations au moment de la période Lapita témoigne de la part notable de l'influence des conditions climatiques sur les comportements humains. Mais lorsque les différents groupes s'installent dans le Pacifique sud-ouest, la multitude de traditions et de paysages insulaires complexifie les relations Homme-milieu, il devient difficile d'associer un changement environnemental régional à un ensemble de modifications des sociétés océaniques. Il est cependant probable que l'homme adapte l'aménagement de son territoire et son comportement de subsistance en fonction des principaux bouleversements écologiques. Les populations océaniques ont ainsi appris à utiliser de façon optimale leur milieu naturel : les techniques de productions horticoles sont adaptées à des arrivées dans des milieux souvent dépourvus de ressources, et permet un stockage des denrées lorsque les conditions climatiques ne sont pas favorables au développement des plantes cultivées (Forestier et Guillaud, 2005).

#### 4. Synthèse de la discussion

Nous avons comparé nos analyses palynologiques et de micro-charbons, réalisées à haute résolution, avec les données paléoenvironnementales et archéologiques, issues de la littérature. Nos données sont issues de deux carottes, l'une prélevée dans le marais d'Emaotfer (Tfer06), et la seconde dans le lac Otas (Ota2). Ce travail nous a permis de mieux comprendre les relations entre les sociétés, le climat et le milieu végétal de l'île d'Efate depuis les 4500 dernières années (figure 11). La synthèse présentée ici retrace par ordre chronologique les événements qui se produisent autour du marais d'Emaotfer, du lac Otas, et des phénomènes qui y sont associés.

Un changement important de la végétation située autour du marais d'Emaotfer est noté vers 3700 ans cal BP : la forêt tropicale humide diminue brusquement et les taxons caractéristiques de la forêt secondaire (Euphorbiaceae, Moraceae et Urticaceae) progressent. À cette même période, la mangrove régresse et est remplacée par de la végétation du littoral. Cette nouvelle dynamique de végétation, qui se produit avant l'arrivée de l'Homme, est à relier à des phénomènes naturels.

À partir de 4000 ans BP, une baisse hydro-isostatique, couplée avec les surrections tectoniques de l'archipel du Vanuatu, vont être à l'origine d'une diminution du niveau de



la mer (Dickinson, 2001, 2003 ; Lecolle et al., 1990). Ce recul entraîne, à partir de 3700 ans cal BP, la régression, puis la disparition de la mangrove vers 3000 ans cal BP. La hauteur des nappes d'eaux souterraines situées près du marais était très probablement influencée par la proximité de l'océan jusqu'à 3700 ans cal BP. Le retrait de la mer a occasionné la baisse du niveau piézométrique, favorisant un milieu plus sec. Cependant, la présence, tout au long de la carotte Tfer06, de l'ostracode *Gomphodella sp.* (Wirrmann et al., 2011a), indique que le plan d'eau ne s'est jamais asséché. La baisse du niveau marin a eu un impact sur l'environnement autour d'Emaotfer mais il ne constitue vraisemblablement pas le facteur principal de changement de la végétation.

Un grand nombre de données paléoclimatiques obtenues dans le sud Pacifique indiquent une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des événements El Niño à partir de 5-4200 ans BP (eg. Brijker et al., 2007 ; Clément et al., 2001 ; Conroy et al., 2008 ; Donders et al., 2007 ; Gagan et al., 2004 ; Haberle et al., 2001 ; Moy et al., 2002 ; Partin et al., 2013 ; Rees et al., 2015). Ainsi, entre 5000 et 1700 ans BP, les saisons sèches sont favorisées. La variabilité climatique s'amplifie vers 3200 ans BP et devient supérieure à celle actuelle entre 2700 et 1700 ans BP. La forêt tropicale humide a supporté les premiers El Niño rapprochés, mais l'intensification de ces événements et la baisse du niveau d'eau des nappes phréatiques ont été à l'origine de sa chute. Il est possible que l'environnement plus sec ait aussi déstabilisé la mangrove, accélérant sa diminution lors du retrait de la mer.

Les premières populations Lapita atteignent l'île d'Efate vers 3100 ans cal BP, mais avant 1300 ans cal BP, l'impact des activités humaines sur la végétation n'est pas observé dans le diagramme pollinique de la carotte Tfer06. Entre 3700 et 1950 ans cal BP, la forêt secondaire domine le paysage, seuls quelques taxons de la forêt semi-décidue sont présents, principalement les Fabaceae et les Mimosoidae. Les activités anthropiques favorisant un état de végétation dégradée, cette ouverture de la végétation peut témoigner de l'influence de l'Homme sur l'environnement. Cependant les déterminations de phytolithes et de grains d'amidon n'ont pas souligné la présence d'horticulture entre 3100 et 2000 ans cal BP à proximité du marais d'Emaotfer. Nous pouvons aussi noter que la forêt secondaire domine le paysage mais que les feux sont presque absents. Cette dynamique est différente de celle observée dans le Pacifique sud-ouest à la même période, où une progression des plantes pionnières et des herbacées est

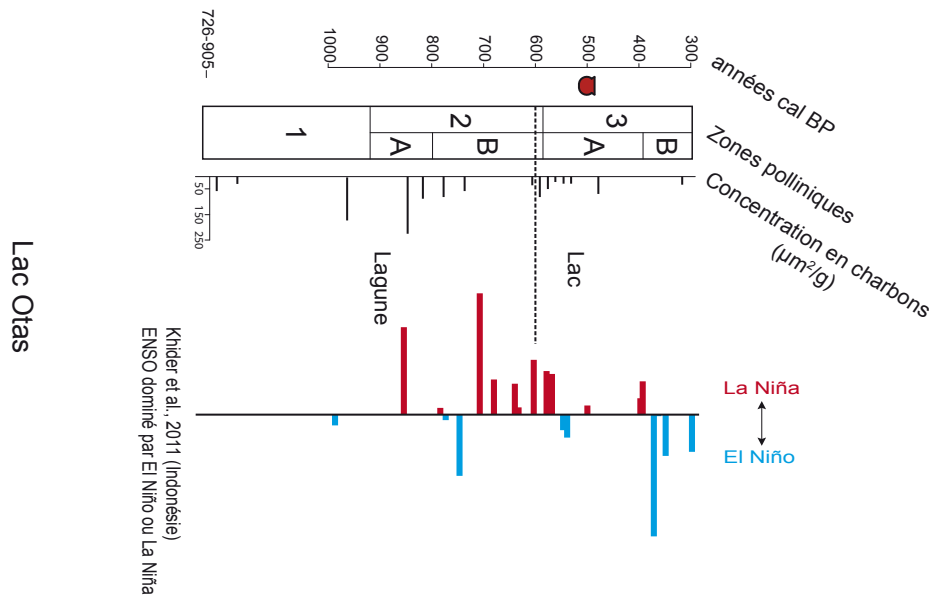
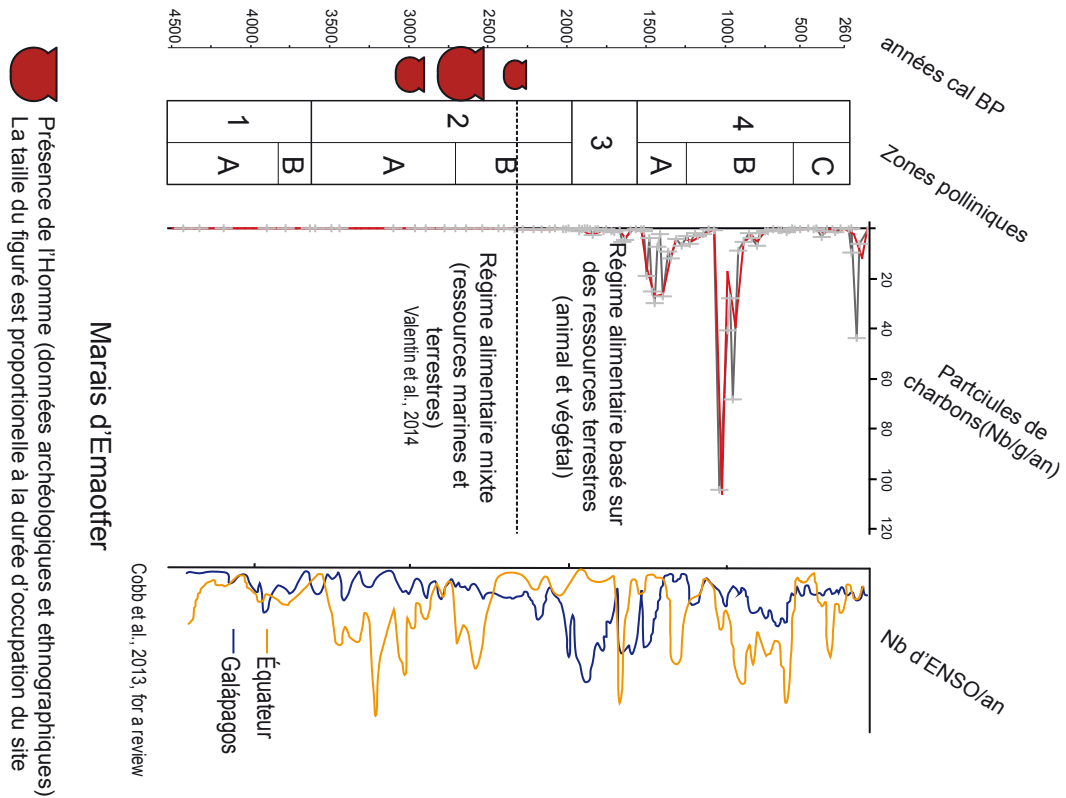


Figure 11 : Mise en parallèle des différentes zones polliniques et des enregistrements de micro-charbons du marais d'Emaotfer et du lac Otas avec les données climatiques (ENSO) et archéologiques (dates d'occupations et régime alimentaire)

associée à une augmentation des charbons. Ces faits sont interprétés comme caractérisant un impact anthropique sur la végétation (Denham et Haberle 2008 ; Fall, 2005 ; Hope et al., 2009 for a review ; Spriggs, 2010 for a review ; Stevenson, 2004). La comparaison de ces données avec les nôtres favorise l'hypothèse d'une faible influence humaine sur la flore du marais d'Emaotfer. Enfin, les résultats issus de la quantification climatique, même s'ils sont peu précis, indiquent des précipitations plus modérées entre 4000 et 2000 ans cal BP.

Les premiers habitants de Teouma sont donc arrivés dans des conditions climatiques relativement sèches, sous l'influence d'évènements El Niño fréquents et marqués. Il a été proposé que des migrations vers l'Océanie Lointaine étaient organisées en période El Niño, lorsque les vents d'est faiblissaient (Anderson 2003 ; Anderson et al., 2006 ; Irwin, 2008 for a review). Une hausse de la fréquence d'évènements El Niño à partir de 3700-3500 ans BP augmenterait donc le nombre de possibilité de départ vers l'est.

Des analyses isotopiques réalisées sur les ossements (humains et animaux) retrouvés dans l'archipel du Vanuatu ont révélé un régime alimentaire mixte lors de la période Lapita, basé sur des ressources issues de la pêche et de la cueillette, une faible activité horticole et le contrôle de quelques animaux, comme le cochon ou le poulet (Bedford et al, 2011 ; Bentley et al., 2007 ; Kinaston et al., 2014a, 2014b ; Valentin et al., 2010b, 2014). Les populations Lapita sont composées majoritairement de navigateurs, qui s'installent rarement longtemps au même endroit. De plus, à Teouma, le climat plus sec a permis une ouverture de la végétation et une population a pu s'installer sans avoir un réel besoin de modifier son nouvel environnement. Les dates issues du cimetière indiquent une occupation de courte durée, environ 200 ans (Petchey et al., 2014). Ces données expliquent l'absence de trace de l'influence humaine sur la végétation autour du marais d'Emaotfer entre 3100 et 2800 ans cal BP.

Bien que l'influence des activités humaines peut être notée dans les diagrammes polliniques dès 3000 ans cal BP (Fall, 2005, 2010 for a review ; Stevenson et al., 2001 ; Stevenson, 2004), les modifications importantes du paysage se sont majoritairement produites à partir de 2000-1500 ans cal BP (Carson, 2008 ; Dotte-Sarout et al., 2010 ; Hope et al., 2009 for a review ; Pearl, 2006 ; Wirmann et al., 2011b). À Teouma, les traces d'occupations sont datées jusqu'à environ 2500 ans cal BP (quelques sépultures

seulement entre 2400 et 2300 ans cal BP), et la population présente dans cette zone n'a vraisemblablement pas favorisé l'horticulture.

Entre 1950 et 1300 ans cal BP, la forêt secondaire est remplacée dans la carotte Tfer06 par de la forêt semi-décidue, puis par de la forêt tropicale humide. À partir de 2100 ans cal BP, la hausse du taux de sédimentation et de la diatomée *Mastogloia elliptica*, caractéristique d'une eau alcaline (apports d'eaux riches en ions), indiquent une augmentation des précipitations (Wirrmann et al., 2011a). Nos résultats révèlent un climat plus humide, probablement lié à une baisse de la fréquence et de l'intensité des évènements El Niño mise en évidence par les données paléoclimatiques (Cobb et al, 2013, for a review ; Moy et al., 2002). Un renforcement des incendies à partir de 1800 ans cal BP est marqué par l'augmentation des charbons. Les pluies vont favoriser les orages, principaux facteurs de déclenchement des feux, et le développement des arbres, une source de combustible notable (Daniau et al 2013 ; Veblen and Kitzberger, 2002).

À partir de 1500-1300 ans cal BP, l'augmentation des taxons introduits, *Musa* (le bananier) et *Phyllanthus* (herbe médicinale et ornementale - Sharma et Singh, 2013) ainsi que des incendies témoigne de l'impact anthropique. Le besoin d'une luminosité importante pour *Musa* (Mémento de l'agronome – collectif CIRAD, 2002) explique la fréquence des feux à cette période. Les fortes proportions de *Phyllanthus* sont plutôt à relier à son potentiel invasif. Les activités humaines commencent ainsi à marquer la dynamique de la végétation autour du marais d'Emaotfer, jusqu'à devenir, à partir de 1300 ans cal BP, le principal facteur à l'origine des modifications du paysage. Une nouvelle progression de la forêt secondaire, en particulier les Euphorbiaceae, Moraceae et Urticaceae, et des herbacées (Asteraceae et Poaceae) est observée à la même période. Ces taxons sont aujourd'hui très fréquents près des habitations (Slik et al., 2003 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Wheatley, 1992). Cette dynamique de végétation est similaire à ce qui a pu être observé dans le Pacifique sud-ouest lors des installations humaines, comme nous l'avons exposé plus haut. À cette végétation dégradée par l'Homme s'ajoute des taxons de la forêt tropicale humide, majoritairement Cunoniaceae et *Peperomia*, jusqu'à 750 ans cal BP, où les Cunoniaceae régressent. Le climat est donc resté humide jusqu'à 750 ans cal BP.

Une diminution du niveau de la mer entre 3000 et 2000 ans BP a entraîné un recul des mangroves, des récifs côtiers et donc des ressources qu'ils généraient. Les

populations auraient alors migré vers l'intérieur des terres et adapté leur alimentation (Carson, 2008 ; Hope et al., 1999 ; Nunn et Carson, 2015). Celle-ci est en effet marquée par une plus forte proportion des ressources terrestres (Field et al., 2009 ; Jones et Kinn, 2009 ; Kinaston et Buckley, 2013 for a review ; Kinaston et al., 2014a ; Valentin et al., 2014). De plus, les navigateurs Lapita ont atteint les îles d'Océanie Lointaine en période sèche, défavorable à la culture de plantes exigeantes en humidité, comme *Musa* ou *Colocasia* (Valentin et al., 2014).

Les sociétés post-Lapita vont ainsi progressivement mettre en place des structures horticoles lors des deux derniers millénaires (Denham et Haberle, 2008). L'installation autour du marais d'Emaotfer, vers 1500-1300 ans cal BP, d'une population sédentaire, de tradition différente des groupes Lapita et post-Lapita précédents et maîtrisant les techniques d'horticultures, est contemporaine de conditions environnementales humides. Le climat a probablement, dans ce cas, influencé les comportements humains. La présence majoritaire de *Musa* et *Phyllanthus*, alors que d'autres plantes introduites tiennent une part importante dans l'alimentation des populations océaniques (*Artocarpus*, *Colocasia* et *Dioscorea*), peut être lié à l'environnement local. *Artocarpus* et *Dioscorea* se développent dans un milieu sec et ouvert, et la culture de *Colocasia* est réalisée dans des jardins irrigués, ou sur des terrasses de la cote est, exposée au vent (Walter et al., 2003). L'environnement autour du marais n'est pas propice à la culture de telles plantes, et nous pouvons supposer qu'il s'agit d'un choix des populations de favoriser des plantations de *Musa*.

Depuis 1500 ans, la végétation autour du marais d'Emaotfer est fortement marquée par l'impact anthropique. À l'inverse, très peu de plantes introduites sont observées à autour du lac Otas, alors que la carotte Ota2 couvre le dernier millénaire. Le marais ne s'est jamais asséché au cours de l'Holocène supérieur et la présence d'un plan d'eau permet à la population d'utiliser l'eau pour boire, de pêcher, l'humidité locale favorise le développement de la végétation (donc de combustible disponible) et permet la culture de plantes exigeantes en eau (Dotte-Sarout, 2010 ; Picornell Gelabert et al., 2011). Le choix de cet endroit pour l'implantation des communautés n'est probablement pas opportuniste mais délibéré. Au niveau du lac Otas, la présence de la mer et les forts alizés sont à l'origine d'un environnement plutôt sec et d'eaux souterraines saumâtres. L'absence de la mangrove, écosystème pouvant fournir suffisamment de ressources pour subvenir aux besoins d'une population (Amesbury, 2007 ; Moss et al., 2015 ;

Tomlinson, 1994), et la géomorphologie du littoral empêche une installation à long terme autour du lac. En revanche, la présence de forts alizés facilite l'accès au site en pirogue à voile et peut expliquer l'arrivée du chef polynésien Roy Mata à cet endroit (Guiart, 1973), alors que tous les sites associés à cette période sont localisés sur la côte ouest, plus abritée (Ballard et al., 2008 ; Coiffier, 2009 ; Garanger, 1972).

À Emaotfer, lors du dernier millénaire, la végétation non dégradée par l'Homme est composée en majorité de taxons de la forêt tropicale humide jusqu'à 750 ans cal BP. Entre 750 et 530 ans cal BP, seule la forêt secondaire persiste, témoin de la forte pression anthropique sur l'environnement. Il est possible, comme le suggère aussi la position particulière d'*Ascarina*, des Cunoniaceae et de *Peperomia* dans le biplot (analyse ACP), que la forêt humide soit localisée à cette période au niveau d'une zone refuge, difficilement accessible à l'Homme, et qu'elle pourrait persister malgré la forte pression anthropique. À partir de 530 ans cal BP (1420 AD), la forêt humide se diversifie, avec le développement des Araliaceae, *Ascarina* et *Syzygium* et la forêt semi-décidue progresse. L'essor de la forêt mixte (taxons de forêt tropicale humide et de forêt semi-décidue) souligne des conditions légèrement plus sèches. Les quantifications climatiques nous montrent qu'à cette période, les précipitations sont abondantes mais présentent d'importantes fluctuations, indiquant des conditions humides et une forte variabilité climatique.

La végétation autour du lac Otas est fortement influencée par la présence de la lagune entre 1000 et 600 ans cal BP. D'après l'ACP, la proximité de l'océan est un facteur plus important de modifications du paysage que les conditions climatiques. Lorsque l'impact de la mer diminue (visible par une baisse de la végétation côtière), à partir de 800 ans cal BP, une diversification des taxons de la forêt tropicale humide et un recul de la forêt semi-décidue sont observés, et témoignent de conditions humides. À partir de 600 ans cal BP et jusqu'à la fin de la carotte, la forêt tropicale humide régresse et s'appauvrit. Elle est remplacée par les Fabaceae et *Acacia*, qui illustrent un climat plus sec. Ces résultats sont similaires à ceux issus du marais d'Emaotfer et confirment l'influence d'un phénomène régional sur la végétation.

La plupart des analyses s'accordent sur les variations climatiques qui ont eu lieu lors du dernier millénaire dans le Pacifique sud-ouest, bien que le sujet reste aujourd'hui débattu. La période datée entre 1300 et 750 ans BP, appelée l'Optimum climatique

Médiéval, est marquée dans le Pacifique sud-ouest par une majorité d'événements La Niña de fortes fréquences et amplitudes, favorisant un climat plus humide et plus variable (Cobb et al., 2003 ; Goodwin et al., 2013 for a review ; Khider et al., 2011 ; Mohtadia et al., 2007 ; Rein et al., 2004 ; Wirrmann et al., 20006, 2011b). Entre 750 et 200 ans BP, lors de la période appelée le Petit Âge Glaciaire, les évènements El Niño dominant (Firth et al., 2014 ; Khider et al., 2011 ; Mann et al., 2009 ; Mattey et al., 2011 ; Partin et al., 2013). Bien que la végétation à Emaotfer soit soumise à une pression anthropique lors du dernier millénaire, l'influence des importantes précipitations entre 1300 et 750 ans cal BP et des conditions plus sèches à partir de 530 ans cal BP, marque la végétation non dégradée par l'Homme présente dans les zones refuges. Ces mêmes variations climatiques sont enregistrées par la végétation du lac Otas et soutiennent les données paléoclimatiques montrant une amplification des évènements La Niña entre 1300 et 750 ans BP et El Niño entre 750 et 200 ans BP.

La surabondance des genres *Piper/Macropiper* (Piperaceae) et la présence de *Piper methysticum* entre 590 et 370 ans cal BP sont associés à une quasi-absence de feu. Les tubercules de la plante *P. methysticum* sont utilisés dans la préparation d'une boisson rituelle appelée kava, possédant des effets anesthésiques, relaxants et antidépresseurs (Lebot et Cabalion, 1986). Ces propriétés se retrouvent chez la plupart des espèces de *Piper* et de *Macropiper* (C. Sam, pers. com.), et peuvent être utilisée par la population à la place du kava, mais *P. methysticum* constitue l'espèce domestiquée actuellement au Vanuatu. Nous avons pu constater un changement climatique à Efate entre 750 et 600 ans cal BP, au moment de la transition Optimum Médiéval/Petit Âge Glaciaire. Cet événement, observé ailleurs dans le sud-ouest Pacifique et appelé parfois « the AD 1300 event », semble avoir bouleversé les sociétés océaniques (Nunn, 2005, 2012 ; Nunn et al., 2007). Les populations insulaires se sont réorganisées pour s'adapter à ces changements, comme en s'abritant majoritairement dans des grottes, en stoppant les échanges de kava, en abandonnant les petites îles ou en fortifiant leur site d'habitation pour faire face aux conflits plus fréquents (Cochrane et al., 2011 ; Dotte-Sarout et al., 2010 ; Field, 2008 ; Field et al., 2009 ; Jones et Quinn, 2009 ; Masse et al., 2006 ; Reepmeyer et Clark, 2010). Cependant, des incohérences chronologiques existent entre les modifications sociales décrites plus haut et les évènements climatiques. Dans notre cas, la surabondance des grains de pollen de *Piper/Macropiper* et une baisse des incendies sont notés peu après la mise en place du climat dominé par El Niño. Un

environnement plus sec peut marquer les stratégies d'aménagement du territoire : les feux, moins nécessaires et surtout plus difficilement maîtrisables, vont être moins favorisés par l'Homme. Mais l'arrivée des polynésiens, en particulier de Roy Mata vers 500 ans BP (1450 AD), va restructurer les sociétés de l'île d'Efate (Ballard et al., 2008 ; Coiffier, 2009 ; Garanger, 1972) et peut être à l'origine de la présence de culture de Piperaceae à Emaotfer. Par la suite, la proportion des *Macropiper* et des *Piper* décline brusquement vers 400 ans cal BP. Cette régression n'est pas associée à un événement climatique ou social connu, et pourrait illustrer une baisse de la fréquentation du site d'Emaotfer.

À l'exception de la couche la plus récente datée de 498 ans cal BP (1452 AD), les différents niveaux de téphras de la carotte Tfer06 ne semblent pas être associés à un changement de végétation. Le dernier dépôt, correspondant probablement à l'éruption du Kuwae, est suivi par une progression de la forêt semi-décidue, des Poaceae et des Urticaceae. La caldera du Kuwae est localisée sur l'île d'Epi, à 90 km au nord du marais d'Emaotfer. Une éruption datée entre 1452 et 1458 AD est reconnue comme l'une des plus importantes de ces derniers 10 000 ans (Gao et al., 2006 ; Pang 1993 ; Plummer et al., 2012). La considérable quantité de particules projetées dans l'atmosphère lors de cet événement (Monzier et al., 1994 ; Witter et Self, 2006) a dû être suffisante pour bloquer les rayons du soleil pendant plusieurs années, affectant la biodiversité des îles alentour. Après cette éruption, une végétation supportant des conditions environnementales plus sèches s'est développée.

Les éruptions catastrophiques comme celle du Kuwae poussent les populations à évacuer leur sites d'habitation (Bedford et Spriggs, 2014 for a review ; Garanger, 1972). L'île d'Efate ne compte plus de volcans actifs depuis l'Holocène inférieur, mais bien que l'éruption du Kuwae semble avoir eu un impact sur la végétation de l'île, les activités humaines ne semblent pas avoir été modifiées à cette période, l'effet de cet événement sur les populations de la région d'Efate devait donc être faible.

Les conditions climatiques, dominées par des El Niño forts et fréquents, ont très probablement influencé les migrations Lapita vers l'Océanie Lointaine autour de 3000 ans BP. L'impact de l'arrivée de l'Homme sur la végétation est distinct d'une île à une autre dans cette région, des comportements de subsistances différents ont coexisté.



Dans le cas du marais d'Emaotfer, des conditions environnementales sèches et les courtes périodes d'occupations des sites expliquent l'absence de l'influence humaine sur le milieu. Durant les deux derniers millénaires, un climat plus humide et une baisse du niveau de la mer ont permis aux populations post-Lapita, plus sédentaires, de favoriser progressivement l'horticulture.

Au Vanuatu, l'époque 1200-600 ans cal BP est très peu connue du fait de la difficulté à identifier les sites sans poteries, notre étude apporte ainsi des informations sur cette période. À partir de 1500 ans cal BP, l'installation, autour du marais d'Emaotfer, d'une population maîtrisant les techniques horticoles et pouvant modifier leur environnement est contemporaine de conditions climatiques humides. En revanche, les conditions difficiles autour du lac Otas n'ont pas permis à un groupe de s'installer à long terme sur ce site. La multitude de traditions et de paysages insulaires complexifiant les relations Homme-milieu, il reste difficile d'associer un changement climatique régional à un ensemble de modifications des sociétés océaniques. Cependant, la population du marais d'Emaotfer semble avoir adapté leur horticulture en fonction des conditions climatiques.

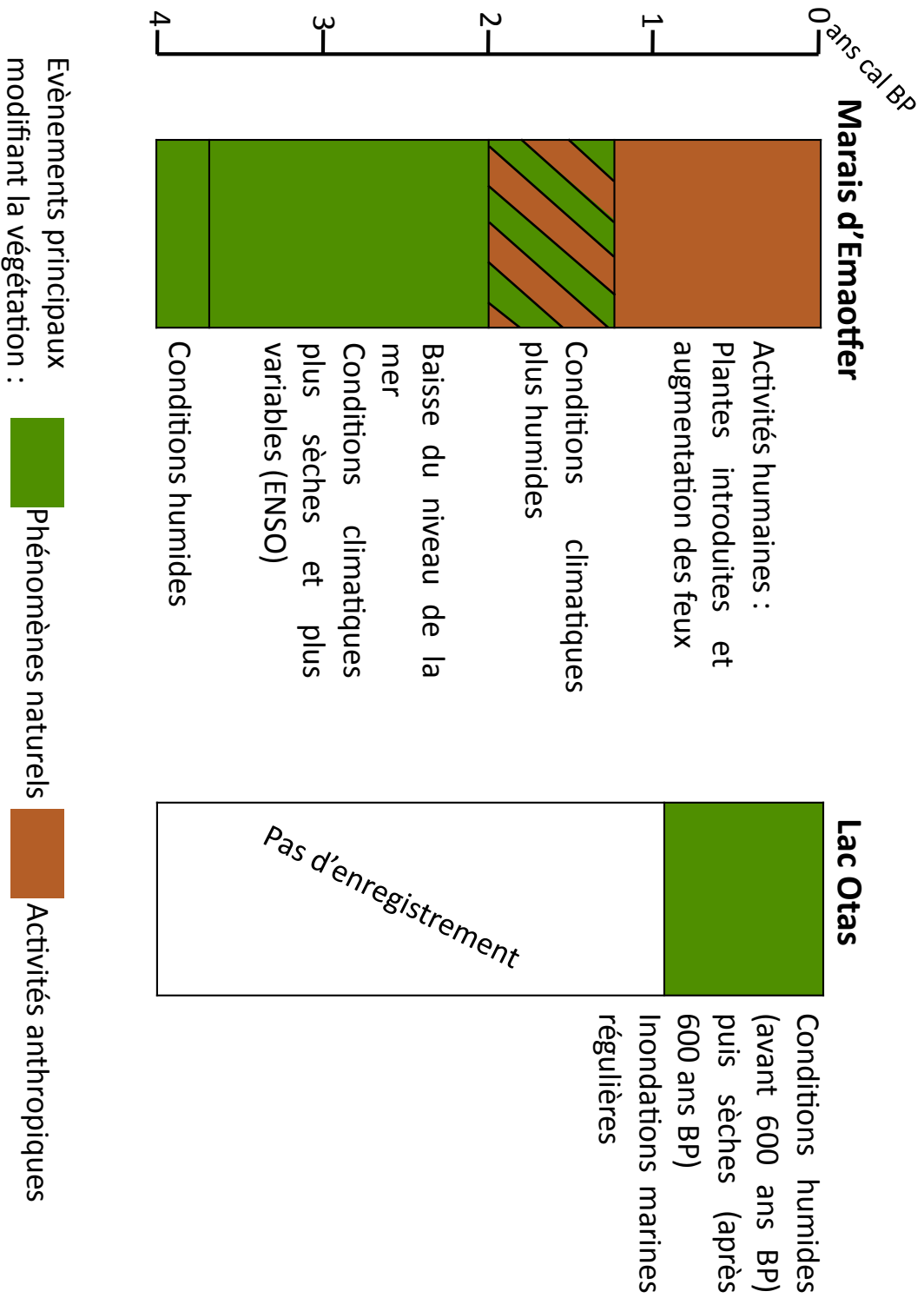


Figure 12 : Résumé des résultats issus des études polliniques et de micro-charbons pour les carottes Tfer06 et Ota2



## Summary of the manuscript

During my three years of my thesis, I was working on late Holocene human-climate-vegetation relations in Vanuatu. I have conducted pollen and micro-charcoal analyses of two palustrine cores, collected from two different sites in Efate Island (central Vanuatu). The aims of this research are first to describe the human influence on the environment since the first migrations, to discriminate the climate impact, which causes these migrations and the landscape modification during the late Holocene; then, to characterize the human behaviour and adaptation on pristine islands, and the changes that these populations brought.

In Remote Oceania (east of the Solomon Islands), the first settlements occurred quite recently, around 3000 yr BP, by navigator bearers of the Lapita culture (Kirch, 2000). The emergence of this culture on Mussau (Papua New Guinea) is dated around 3400 cal yr BP (Denham et al., 2012). There are several hypotheses concerning the causes of these migrations, and environmental changes, as proposed by Anderson et al. (2006), have to be taken into account in the settlement proceeding. The arrival of populations on pristine islands has an influence on the native fauna and flora, but the human impact is not a homogeneous historical process, and landscape responses vary for each site examined (eg. Carson, 2008; Fall, 2005; Hope et al., 2009, for a review; Stevenson, 2004; Wirmann et al., 2011b).

The Vanuatu archipelago is located on the subduction zone between Australia and Pacific tectonic plates. The islands are of volcanic origin; some are dated from the late Oligocene. The Efate Island is the result of a submarine explosion, dated from the early Pleistocene. Tectonic uplifts had raised fossil coral reefs, at the origin of the limestone platforms (Quantin, 1972-1977). The archipelago is under the influence of 2 convergence zones, ITCZ (InterTropical Convergence Zone) and SPCZ (South Pacific Convergence Zone). The northward and southward shifts of these zones are represented by 2 seasons: wet, from November to March, and dry, from April to October (Beucher, 2010, for a review). Every 2-7 years, the El Niño/La Niña phenomenon, also called ENSO, modify the Vanuatu climate by fostering longer dry (El Niño) or wet (La Niña) seasons (Wyrтки, 1975).

The Vanuatu archipelago, under the SPCZ and the ENSO influence and also constituting one of the first areas reached by Lapita navigators, is a key region for the perception of the human-environment relations in Remote Oceania during the late Holocene.

The first and longest core, Tfer06 is collected from the Emaotfer Swamp, on the south coast of Efate. An important archaeological site is located close to the swamp. This site is composed of three different areas, dated to three different periods. First, an important burial zone, called the Teouma cemetery, is dated ca. 3100–2900 cal yr BP, or slightly later ca. 2880–2800 cal yr BP (Petchey et al., 2014). The Teouma cemetery is an outstanding discovery, due to the significant number of burials (nearly 70 and remains of just over 100 individuals, some accompanied with pots), which represents an early phase of Lapita migration into Remote Oceania (Bedford et al., 2006, 2009). Subsequent to the cemetery, some 50 cm of midden also dated ca. 3100-2880 yr cal BP was deposited and result of habitation activities. Then, the settlement expansion across the cemetery area during the post-Lapita period is recorded by some 50 cm of midden, associated with the Arapus-Erueti cultural transition (2800-2500 yr cal BP). Finally, several Erueti period burials (2400-2300 cal yr BP) were interred some 70 m away to the south of the Lapita cemetery.

The second core, Ota2, is collected from the Otas Lake, on the east coast of Efate. The ethnological studies date the first human settlement around 500-450 yr BP (1450-1500 AD), associated with the Roy Mata arrival. Roy Mata was a powerful Polynesian chief, who restructured Efate and the surrounding islands societies, and restored peace to this region at ca. 1600 AD (Ballard et al., 2008; Coiffier, 2009; Garanger, 1972; Guiart, 1973).

For each core, we conducted radiocarbon dating thanks to the LMC14 laboratory (UMS 2572, CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC) at Saclay (France). The chronology is based on 16 samples (bulk disseminated organic matter, vegetal remains, wood fragments, pollen and gastropod shells) and 12 samples (bulk disseminated organic matter, vegetal remains and wood fragments), respectively for cores Tfer06 and Ota2. Several dates are not taken into account, as presenting sediment reworking (signs of transportation and/or allochthonous material, mostly roots). Radiocarbon ages were calibrated using Oxcal 4.2.2. with the Southern Hemisphere data set (ShCal13 - Bronk Ramsay et Lee, 2013) and the two sigma probability ranges. The age-depth models were deduced by

fitting a smooth curve to the ages. The curve of the age-depth model generated on the same dates by Bayesian statistics (P\_sequence model, Oxcal 4.2.2) matches the curve obtained from the smooth.

Pollen and micro-charcoal analyses have been conducted for the both cores. We have treated separately micro-charcoal larger than 160  $\mu\text{m}$  (more fragile than smaller particles and pollen) only for core Tfer06, the Ota2 material was less preserved and do not allow such study. Pollen and micro-charcoals smaller than 160  $\mu\text{m}$  were counted on the same slides. For the pollen determination, the entire slides were analysed. On average 150–200 pollen grains and 30 taxa were identified on each sample, and a total of more than 100 taxa were identified. Micro-charcoals larger than 160  $\mu\text{m}$  were counted by the Winseedle software, which also enables us to obtained the area, the maximum length and width. We conducted a few phytoliths and starch grains determinations, in order to identify the occurrence of introduced and cultivated plants, *Musa*, *Dioscorea* and *Colocasia*. In Oceania, populations consume *Dioscorea* and *Colocasia* tubers. The development of these tubers are favoured by flowers clearing, so *Dioscorea* and *Colocasia* pollen are very scarce in pollen diagram. Sedimentological, diatoms and ostracods analyses are presented in Wirmann et al. (2011) for core Tfer06. D. Wirmann and J-P. Debenay respectively carried out sedimentological and foraminifera analyses for core Ota2.

We executed several statistic treatments to our results. In order to identify the pollen zones by realized homogeneous groups of palynological data, we performed first a statistical analysis, “Cluster Analysis Constrained by Sum of Squares” (CONISS). Then, we conducted a Principal Component Analysis (PCA) to provide additional information on the relation between each taxon and the past environment. In tropical areas, the flora diversity can confuse the ecological determination of the palynological results. Moreover, swamps and lakes are refuge areas, which enable the development of wetland taxa, even during dry period. The statistical analyses can help us to interpret our results. Finally, we will present first reconstructions of past temperatures and rainfalls. Quantifying paleoclimate from pollen data is now an important part of the paleoenvironmental studies. Several techniques exist, adapted to different contexts. In our case, we chose density probability functions in order to connect all climate spaces (physical conditions that allow species to flourish) of each taxon to past temperature and rainfall (Schözel, 2005). It was not enough to only estimate the possible

minimum/maximum temperature and precipitation, the achieved results were scattered and imprecise. It was necessary to calculate expected values and accuracy of four variables (minimum temperature, maximum temperature, minimum precipitation, maximum precipitation), with considering each taxon percentage. This method can provide finer results, but does not exclude the biases linked to taphonomic processes, production and dispersal of pollen grains, which depending on the different species.

The longest core, Tfer06, spans at least a period from 6670 cal yr BP to the present, and from the base to the top, three main lithological sequences were identified (Wirrmann et al., 2011a). The Unit I and II have a gradational horizontal contact, the Unit II and III a sharp horizontal contact. Between 480 and 431 cm depth (Unit I), the deposits appear homogeneous and are clay-rich organic sediments; its colour varies from light brown to dark. The dry density varies between 0.15 and 0.3 g.cm<sup>-3</sup>. A poor organic matter gel replaces the clay, up to 150 cm depth (Unit II). The matrix of the sediment is a fine compact mud, containing a large number of gastropods and ostracods shells. The colours present a succession of pinkish to reddish brown hues, with light red, dark-reddish gray, and white patches. Two sub-units can be distinguished: Unit IIA (430-282 cm), with a dry density ranging between 0.1 and 0.4 g.cm<sup>-3</sup>, consisting of a very large quantity of ostracods valves and leaves fragments; Unit IIB (281-151 cm), with a density dry from 0.1 to 0.2 g.cm<sup>-3</sup>. The Unit III extends from 150 cm to the top of the core, appears homogeneous, correspond to peat deposits and the colours vary from dark brown to black. The dry density is very consistent, around 0.1 g.cm<sup>-3</sup>, and is the lowest value of the whole core. Several tephra layers, from 1 to 5 cm thick, indicate volcanic activity near Efate Island. These tephra are located at 292, 277-282, 142-143 and 42-43 cm depth. We have selected our samples depending on the pollen grains diversity, detected during a preliminary palynological study conducted by A-M Sémah, and on the rate of sedimentation, as a high-resolution analysis is required. The low rate of sedimentation of the Unit I (0.17 mm/yr) is unsuitable with a high-resolution study, and few samples from this unit were selected. The rate rose in the Unit II (1.4 to 2.1 mm/yr), but the pollen grains are poorly preserved. The samples were collected every 5 to 15 cm, according to the occurrence of barren levels. The important rate of sedimentation of the Unit III (1.2 mm/yr) and the great preservation of the pollen grains

provides us the best resolution for this part of the core, and samples are collected every 2 to 9 cm.

Core Ota2 spans approximately the last millennium, and consists of an alternation of organic levels and sand beach sediments. Unlike core Tfer06, each unit has a particular rate of sedimentation; some levels were deposited rapidly, others more slowly. The sedimentological and micro-faunal analyses indicate that the lake has probably been linked to the sea during the late Holocene. It was a tidal lagoon, which was probably closed by a barrier beach around 600 cal yr BP, at the origin of the Otas Lake. But the sea has regularly invaded the site until 300 cal yr BP. The organic deposits are composed of plant and animal remains, brought into the lake by runoff. The age-depth model allows us to identify three distinct periods: the top of the core, dated ca. 300 yr cal BP, an area between 50 and 100 cm depth dated around 600 cal yr BP, and between 100 and 130 cm depth, a zone dated from 800 to 1000 yr cal BP. The irregular rate of sedimentation prevents us from applying the age-depth model to date the base of the core, at 175 cm depth. Samples for pollen analysis could only be collected in the organic matter level.

The ecological interpretations are based on Backer et Bakhuizen van den Brink, 1965; Munzinger and Lowry (2011), Siméoni (2009), Smith (1979) and Wheatley (1992). Pollen taxa are presented according to the eight following ecological groups:

- Rainforest mainly consists of Araliaceae (*Meryta* and *Schefflera*), *Ascarina*, Cunoniaceae (*Geissois* and *Weinmannia*), *Syzygium*, *Peperomia*, *Podocarpus* and *Nauclea*. This forest characterizes high rainfall (until 400mm/month).

- Mixed deciduous forest is characterized by Fabaceae (including Mimosoideae), Sapindaceae and *Celtis*. This forest includes trees and shrubs adapted to lower rainfall (until 320mm/month) than the rainforest.

- Disturbed forest (or secondary forest) comprises Euphorbiaceae (*Acalypha*, *Mallotus/Macaranga*, and *Homalanthus*) *Trema*, Malpighiaceae, Moraceae, Urticaceae and *Piper/Macropiper*. These plants develop if a (natural or human) perturbation impacts the rainforest or the mixed deciduous forest.

- Introduced taxa are principally constituted by *Musa* (banana) and *Phyllanthus* (a medicinal herb).

- Swampy vegetation is principally composed of herbs, Amaranthaceae, Cyperaceae and Nymphaeaceae.



- Mangrove forest, located in the intertidal zone, consists of Rhizophoraceae (*Bruguiera*, *Ceriops* and *Rhizophora*), and *Sonneratia*.
- Coastal vegetation comprises *Cocos*, *Casuarina equisetifolia*, *Calophyllum inophyllum*, *Excoecaria* (also in back mangrove) and *Ipomoea*.
- Poaceae and Asteraceae are heliophilous herbs, occurred in open landscape and areas with low rainfall.

The result of the CONISS and the PCA analyses for core Tfer06 are consistent, and indicate 4 pollen zones. The statistical signals on the PCA graph allow us to determine the two main factors that influence the taxa distribution. The first axis reflects moisture conditions (dry/wet environment) and the second axis the opening of the landscape and the anthropogenic impact (open landscape and disturbed vegetation/closed landscape and natural vegetation).

In the case of core Ota2, according to the PCA analysis, the sea influence (tidal lagoon/lake with fresh water) seems to be the dominant factor of the vegetation changes, and corresponding to the first axis. The second axis, less important, reflects moisture conditions (dry/wet environment). The cluster analysis reveals 3 pollen zones, also detected by the PCA, but some results are inconsistent between the two analyses, probably due to the small number of samples (only 15).

In the Tfer06 record, a significant vegetation change occurred around 3700 cal yr BP: the rainforest abruptly decreased, and the disturbed forest taxa (Euphorbiaceae, Moraceae and Urticaceae) progressed. During this period, the mangrove forest declined, and is replaced by the coastal vegetation. This vegetation dynamics has taken place before the first human migration, is link to a natural phenomenon. After 4000 years BP, a hydro-isostasic drawdown was coeval with tectonic uplifts in Vanuatu, and induced a sea-level decreasing (Dickinson, 2001, 2003; Lecolle et al., 1990). This drop is marked by the loss of the mangrove forest after 3700 cal yr BP. The height of the watertable located close to the swamp was probably influenced by the proximity of the sea until 3700 cal yr BP. The sea-level fall caused the decrease of the piezometric level, leading to a drier environment. However the occurrence of the ostracod *Gomphodella* sp. throughout the core attests to the presence of permanent water at the site (Wirrmann et al., 2011a). Thus, the sea-level drop had an impact on the environment, but probably

constitute a minor factor of the vegetation change. A significant driver for environmental transformation could be the ENSO phenomenon, the primary cause of long-term trend of climate variability for the south Pacific region (Moy et al., 2002). From 5-4200 cal yr BP, El Niño events, associated with longer dry season in the southwest Pacific area, increased in magnitude and number (eg. Brijker et al., 2007; Clement et al., 2001; Conroy et al., 2008; Donders et al., 2007; Gagan et al., 2004; Haberle et al., 2001; Moy et al., 2002; Partin et al., 2013; Rees et al., 2015). The next peak in sustained El Niño occurred between 3200 and 1700 yr BP. The rainforest has supported the first notable El Niño events until 3700 cal yr BP, and then decreased. The watertable fall has probably precipitated the decline of the rainforest. The disappearance of the mangrove forest may have been further accentuated by the dry period.

On Efate Island, Lapita people began to settle around 3100 cal yr BP on the south coast, but the human impact is only recorded on core Tfer06 after 1500 cal yr BP. Between 3700 and 1950 cal yr BP, the disturbed forest reached maximum values (70%), and a few taxa of the mixed deciduous forest (principally Fabaceae and Mimosoidae) are observed. Human activities, as climate changes, can cause vegetation disturbance, but the decrease in the diatom *Cymbella cymbiformis* illustrates a very low water level in the swamp between 2500 and 2100 cal yr BP (Wirrmann et al., 2011a) probably due to drier conditions. Moreover, we have found no evidence of *Musa*, *Dioscorea* or *Colocasia* phytoliths and starch grains in the core between 3100 and 2000 cal yr BP. An increase in fire after 3000 yr BP in the southwest Pacific is generally associated with human activities (Denham et Haberle, 2008; Fall, 2005; Hope et al., 2009 for a review; Spriggs, 2010 for a review; Stevenson, 2004). The absence of fire, until 1800 cal yr BP, around the Emaotfer swamp supports the hypothesis of a low human influence on the environment. The results obtained from the climate quantification, even if they are imprecise, indicate a decrease in rainfall between 4000 and 2000 cal yr BP. The first seafarers reached Teouma under dry conditions, during a period of frequent and sustained El Niño. It was suggested that the migrations to Remote Oceania were planed during an El Niño period, when the easterlies declined (Anderson, 2003; Anderson et al., 2006; Irwin, 2008 for a review). Thus, an increase in El Niño frequency at ca. 3700-3500 cal yr BP would multiply the number of chance to go east by sail.

Although the human impact can be recorded in the pollen diagrams from 3000 cal yr BP (Fall, 2005, 2010 for a review; Stevenson et al., 2001; Stevenson, 2004), important

landscape changes have mostly occurred from 2000-1500 cal yr BP (Carson, 2008; Dotte-Sarout et al., 2010; Hope et al., 2009 for a review; Pearl, 2006; Wirmann et al., 2011b). The Lapita people appear to have benefit from a diet including a large range of food items from fishing and gathering. The horticultural activity was low and some animal (pig and chicken) diets are controlled (Bedford et al., 2011; Bentley et al., 2007; Kinaston et al., 2014a, 2014b; Valentin et al., 2010, 2014). Lapita sites seem to have been occupied during a short time (Bedford, 2006b), therefore few horticultural activities were developed in these sites. Moreover, the dispersal of Lapita people occurred after the onset of drier climate, these conditions have resulted in a landscape opening. A population could settle on a southwest Pacific island without needed to modify the environment. At Teouma, the settlement evidences are dated from ca. 31000 to 2500 cal yr BP (a few burials are dated between 2400 and 2300 cal yr BP), people have not probably developed horticulture during this period.

Between 1950 and 1300 cal yr BP, the mixed-deciduous forest, then the rainforest, replaced the disturbed forest in the Tfer06 record. From 2100 cal yr BP, the rise in the rate of sedimentation, in the diatom *Cymbella cymbiformis* and in *Mastogloia eliptica* indicate a rainfall increasing (Wirmann et al., 2011a). These results reveal a more humid climate, consistent with the paleoclimatic data which highlighting a decrease in El Niño frequency and magnitude (Cobb et al., 2013 for a review; Moy et al., 2002). From 1800 cal yr BP, a micro-charcoal rising shows an intensification of fires. The rainfalls are associated with thunderstorms, the main triggering event for fires, and facilitate the development of trees, a significant fuel source (Daniau et al., 2013; Veblen and Kitzberger, 2002).

From 1500-1300 cal yr BP, the introduced taxa (principally *Musa* and *Phyla*) and fire increasing indicate an anthropogenic impact. At the same period we can observe the development of markers of disturbance, as Euphorbiaceae, Moraceae, Urticaceae, and of herbaceous taxa (Asteraceae and Poaceae). This type vegetation dynamics is observed everywhere in Remote Oceania during a human settlement. Several rainforest taxa, particularly Cunoniaceae and *Peperomia*, are well represented until 750 cal yr BP, and show wet climatic conditions. A decrease in sea level between 3000 and 2000 years BP caused the decline of mangroves, coastal reefs and resources they produce. Populations had to adapt their diet (Carson, 2008; Hope et al., 1999; Nunn et Carson, 2015), and gradually consumed a higher proportion of vegetal resources and herbivore flesh during

the last two millennia (Field et al., 2009; Jones et Kinn, 2009; Kinaston et Buckley, 2013 for a review; Kinaston et al., 2014 Valentin et al., 2014). Thus, a sedentary population settled, around 1500-1300 cal yr BP, around the Emaotfer Swamp. This group could manage horticultural production and have reached the site under wet environmental conditions. In this case, climate has probably influenced the human behaviour. The absence of other introduced plants (*Artocarpus*, *Colocasia* and *Dioscorea*) than *Musa* and *Phyllanthus* can be linked to the local environment. *Artocarpus* and *Dioscorea* develop in a dry, open landscape and *Colocasia* culture is carried out on irrigated gardens, or on terraced east coast, exposed to the wind (Walter et al., 2003). The Emaotfer Swamp environment makes such plants cultivation difficult; we can suggest a conscious choice to particularly develop *Musa* production.

From 1500 years, the vegetation around the Emaotfer Swamp has been strongly influenced by human impacts. Conversely, very few introduced taxa are observed around the Otas Lake, while core Ota2 covers the last millennium. The permanent water at the Emaotfer Swamp could be used for drinking and fishing; the local moisture promotes the vegetation development (fuel) and enables the water demanding plants cultivation (Dotte-Sarout, 2010; Picornell Gelabert et al., 2011). Around the Otas Lake, the proximity of the sea and the strong trade winds cause a dry environment and brackish groundwater. The absence of mangrove ecosystem, which can provide resources (food items, fuel - Amesbury, 2007; Moss et al., 2015; Tomlinson, 1994), and the coastline geomorphology prevent a long-term settlement around the lake. On the other hand, the strong winds make this site easily accessible by sailing canoe. It could explain the Polynesian Chief Roy Mata arrival at this place (Guiart, 1973), while the other sites dated at the same period are located on the west coast, more sheltered from the wind (Ballard et al., 2008; Coiffier, 2009; Garanger, 1972).

During the last millennium, the rainforest persisted until 750 cal yr BP at Emaotfer Swamp and until 600 cal yr BP at Otas Lake. Between 750 and 530 cal yr BP, the disturbed forest only occurred at Emaotfer, indicating a strong human impact on the environment. From 530 years cal BP (1420 AD), the mixed forest (rainforest and semi-deciduous forest taxa) developed and reveals slightly drier conditions. At the Otas Lake, from 600 cal yr BP to the end of core Ota2, the rainforest decreased and became impoverished. Fabaceae and *Acacia* replaced the rainforest, indicating a drier climate.

The results from cores Tfer06 and Ota2 are similar and show a regional phenomenon impact on the vegetation.

Although the subject is still debated today, most of the analyses suggest two different climatic periods during the last millennium in the southwest Pacific. Between 1300 and 750 cal yr BP, corresponding to the Medieval Warm Period (MWP), frequent and sustained La Niña events leading to a more variable and more humid climate (Cobb et al., 2003; Goodwin et al., 2013 for a review; Khider et al., 2011; Mohtadia et al., 2007; Rein et al., 2004; Wirmann et al., 2006, 2011b). Between 750 and 200 cal yr BP, during a period called the Little Ice Age (LIA), El Niño events became predominant (Firth, 2014; Khider et al., 2011; Mann et al., 2009; Matthey et al., 2011; Partin et al., 2013). The climatic variations recorded by the Otas Lake and the Emaotfer Swamp vegetation (even subjected to anthropogenic impacts) support the palaeoclimatic data that point out an increase in La Niña events between 1300 to 750 cal yr BP and in El Niño events between 750 and 200 cal yr BP.

Between 590 and 370 cal yr BP, a *Piper/Macropiper* (Piperaceae) taxa overabundance and the occurrence of *Piper methysticum* are associated with a nearly total absence of fire. These taxa (*P. methysticum* is the domesticated plant variety in Vanuatu) are used in the preparation of a ritual beverage called kava, which possess anaesthetic, relaxant and antidepressant effects (Lebot et Cabalion, 1986). We have observed a climatic change between 750 and 600 cal yr BP during the MWP/LIA transition. This event, observed elsewhere in the southwest Pacific and called "the AD 1300 event", seems to have marked the oceanic societies (Nunn, 2005, 2012; Nunn et al., 2007). The island populations are forced to adapt to these changes, as suggested by the abandonment of open site for settlements in cave, the suspension of the kava trade, the leaving of small islands or the emergence of fortification to cope with more frequent conflict (Cochrane et al., 2011; Dotte-Sarout et al., 2010; Field, 2008; Field et al., 2009; Jones et Quinn, 2009; Mass et al., 2006; Reepmeyer et Clark, 2010). However, some chronological inconsistencies exist between the social changes described above and the climatic events. In our case, the *Piper/Macropiper* overabundance appears shortly after the emergence of a climate driven by El Niño events. A drier environment can affect land-use strategies: fires become for instance less necessary and especially more difficult to control. But the Polynesians and Roy Mata arrivals ca. 500 years BP (1450 AD) have restructured the Efate Island societies (Ballard et al., 2008; Coiffier, 2009; Garanger,

1972) and could contribute to the Piperaceae culture around the Emaotfer Swamp. Thereafter, the proportion of *Macropiper* and *Piper* declined sharply after 400 years cal yr BP. This regression cannot be associated with a known social or climatic event, and could indicate a progressive abandonment of the site.

With the exception of the most recent layer dated ca. 498 cal yr BP (1452 AD), the different tephra levels in core Tfer06 seem to be not related to a vegetation change. The most recent deposit, probably corresponding to the Kuwae eruption, is followed by a rise of the mixed-deciduous forest, Poaceae and Urticaceae. The Kuwae caldera is located on the Epi Island, 90 km north of the Emaotfer Swamp. An eruption, dated ca. 1452 AD, is recognized as one of the most important of these 10,000 years (Gao et al., 2006; Pang 1993; Plummer et al., 2012). The large quantity of particles projected into the atmosphere during this event (Monzier et al., 1994; Witter and Self, 2006) had probably stopped the sunrays for several years and modify the surrounding islands biodiversity: around Emaotfer, we can observe a dry vegetation development during this period. Catastrophic eruptions, such as the Kuwae, constrain population to evacuate and rendering the landscape uninhabitable for some period of time (Bedford et Spriggs, 2014 for a review; Garanger, 1972). Efate Island has no more active volcanoes since the early Holocene, but, even if the Kuwae eruption had probably affected the island vegetation, the human activities seem to remain unchanged, so the impact of this event on Efate populations should be low.

The new results brought by my research confirm the assumption of a link between climate changes and human settlements in Remote Oceania. They also discriminate climate from human influence on late Holocene vegetation for the first time in Vanuatu and describe the human adaptation to a pristine island. The data obtained from the climate quantification are imprecise, as we have little details concerning the rainfall and temperature conditions for each taxon. However, these preliminary results, obtained for the first time for the Vanuatu, have brought new information to the pollen diagrams, in particular on climate variability. These calculations have been carried out and could be employed when more accurate weather data will be available.

Lapita people reached Efate Island ca. 3000 cal yr BP under dry climate conditions, due to frequent and sustained El Niño events. During this period, easterly winds stopped and favour sailing eastward. These results support the hypothesis developed by

Anderson et al. (2006), who modelled the Lapita migration eastward under low trade winds. Lapita people were seafarers and fishers-gatherers and they had little impact on the environment. A new population settled this site from 1500-1300 cal yr BP, developed medicinal, ceremonial and food plants cultivations and has probably practiced slash and burn. This group lived under humid climate, also more suitable to the development of horticulture. Our results show population adaptations to a new territory, with new environmental and climatic constraints. The Lapita people were adapting to their new environment, while sedentary populations modified their territory according to their needs.

For future researches, it would be appropriate to conduct high-resolution palynological studies on cores collected from Santo and Tanna Island. Santo is the biggest island of the Vanuatu archipelago, with a wide diversity of vegetation types and has been the subject of an important expedition in 2006. Several archaeological sites have been discovered in the surrounding islands near the south coast of Santo (Bedford, 2006b; Galipaud et Swete-Kelly, 2007). Tanna Island includes an active volcano (Mnt. Yasur) the vegetation and population are adapted to this particular environment, very different from Efate Island. The choice of the Islands, from North (Santo) to South (Tanna), is also to highlight the effects of a latitudinal climate graduation on environments. These results will be then compared with Efate Island data. Another objective is to pursue the pollen grains dating. The method we used is time consuming, but the pollen grains dating significantly reduce the biases associated with sediment reworking or the occurrence of allochthonous elements. The pollen rain does not give an accurate picture of the vegetation, some species are over- or under-represented and we have not enough data on the land cover to develop a robust model of past landscapes and climates. This work, mostly performed for Europe, America and Africa, began to be carried out for Asia and Oceania and take into account the human impact on vegetation dynamics (project LandCover6k). In the case of Vanuatu, it will be necessary to obtain more information on the pollen rain (production and dispersion of pollen grains) for a maximum of taxa, the ecological needs of plant species and the specific climate parameters for each island.







## Conclusion

Lors de mes trois années de thèse, j'ai pu étudier, à haute résolution, des carottes palustres issues de deux sites, sur l'île d'Efate située au centre du Vanuatu, le marais d'Emaotfer et le lac Otas. Les nouveaux résultats qu'apporte ma recherche permettent de confirmer les hypothèses émises sur le peuplement du Vanuatu et de décrire l'adaptation de l'Homme à un territoire insulaire vierge. Pour la première fois, nous avons également pu déterminer l'impact de l'Homme et du climat sur la végétation holocène du Vanuatu.

Les populations Lapita, originaires probablement de Papouasie Nouvelle-Guinée, ont atteint le nord du Vanuatu vers 3200 et la côte sud d'Efate vers 3000 ans cal BP. Elles se sont déplacées lorsque les conditions climatiques étaient relativement sèches, sous l'influence de plus forts et plus fréquents El Niño. Lors d'un événement El Niño, les alizés, vents d'est, s'affaiblissent ou s'arrêtent, facilitant la navigation à voile d'ouest en est. L'augmentation du nombre d'El Niño multiplie donc les opportunités de migrations pour les populations de Papouasie Nouvelle-Guinée vers l'Océanie Lointaine.

Les navigateurs Lapita étaient des pêcheurs-cueilleurs, ces populations ont peu modifié leur environnement autour d'Emaotfer. Les courtes durées d'occupation des sites à cette période et l'environnement sec ne favorisent pas le développement de l'horticulture. Il ne faut cependant pas oublier que les populations Lapita étant des navigateurs, dont la vie devait être fortement liée à leurs embarcations. Mais aucune pirogue de cette période a pu être retrouvée, et une partie de l'histoire des Lapita restera donc très probablement toujours manquante. Après une première installation à la période Lapita, quelques groupes se sont succédés sans non plus avoir de réel impact sur la végétation d'Emaotfer. À partir de 1500-1300 ans cal BP, une nouvelle population s'est installée sur cette partie de l'île. Celle-ci en revanche a exercé la culture de plantes médicinales, rituelles et alimentaires et a vraisemblablement pratiqué l'agriculture sur brûlis. Les conditions plus humides présentes lors de l'établissement de cette communauté autour d'Emaotfer ont très probablement favorisé le développement de l'horticulture. Nous l'avons vu, la culture de plantes introduites n'est pas la seule

pratique susceptible d'influencer le paysage végétal, d'autres activités anthropiques, telles que la cuisine ou la construction d'habitations, peuvent modifier l'environnement, sans que nous puissions distinguer ces différents événements dans nos diagrammes polliniques. Afin de mieux comprendre l'aménagement de ces territoires, l'étude de macrorestes végétaux est à envisager.

La carotte prélevée dans le lac Otas couvre le dernier millénaire mais ne présente pas de trace d'impact anthropique sur la végétation. Le site, en bord de mer et exposé au vent, offre peu d'intérêt à une installation à long terme, par contre, les forts alizés facilitent son accès à la voile. Il est probable que des populations aient atteint Efate à cet endroit, mais aucun groupe ne s'y est réellement établi.

Une fois installés sur une île, les groupes doivent supporter, et s'adapter si besoin, aux conditions environnementales. Une première modification du comportement humain est révélée par une différence de régime alimentaire entre les populations Lapita et post-Lapita. Ce bouleversement est associé à une baisse du niveau de l'océan, engendrant une diminution des ressources marines, et à une humidification du climat. À cette période, les sociétés post-Lapita ont progressivement intégré à leur alimentation un plus grand nombre de plantes et d'animaux terrestres par rapport aux communautés Lapita et ont donc favorisé l'horticulture. De même, autour du marais d'Emaotfer, la présence majoritaire de *Musa* serait due à l'environnement local, plus propice à la culture de *Musa* qu'à celle *Dioscorea* ou *Colocasia*. Au cours du dernier millénaire, le marais d'Emaotfer et le lac Otas enregistrent un bouleversement de la dynamique de végétation vers 700-600 ans cal BP, lié un assèchement du climat sous l'influence d'importants et fréquents El Niño. Des changements sociétaux sont observés à cette époque dans le sud-ouest Pacifique, bien que ceux-ci ne soient pas toujours synchrones avec les périodes de modifications climatiques. Autour du marais d'Emaotfer, les conditions plus sèches sont associées à une baisse des feux et une diversification des plantes cultivées, marquée par l'apparition de *Piper methysticum* à partir duquel est produit le kava, une boisson rituelle. Un climat plus sec peut être à l'origine d'une diminution de l'utilisation des feux par l'Homme, ceux-ci devenant moins nécessaires et plus difficilement contrôlables. Mais l'arrivée à Efate d'une population de culture polynésienne peut aussi favoriser la mise en place de nouvelles structures horticoles.

L'archipel du Vanuatu est d'origine volcanique, cependant Efate ne compte plus de volcan actif depuis le début de l'Holocène inférieur. L'éruption catastrophique du Kuwae, situé sur l'île d'Epi au nord d'Efate, vers 498 BP (1452 AD), semble avoir influencé la dynamique de végétation à Emaotfer, probablement en lien avec un changement climatique à court terme. Les études ethnographiques indiquent une migration des populations vivant près du Kuwae vers Efate, donc l'impact de cet événement ne semble pas avoir modifié les comportements des habitants d'Emaotfer.

Ces résultats démontrent l'adaptation des populations à un nouveau territoire, avec de nouvelles contraintes environnementales et climatiques. Les navigateurs Lapita se sont accoutumés à leur nouvel environnement et nous avons mis en évidence que des populations plus sédentaires ont aménagé ce territoire selon leurs besoins. Il serait cependant trop simple de définir l'impact de l'installation humaine comme seul facteur de modification du milieu naturel. Nous avons ainsi fait ressortir de nos analyses que l'association des diverses cultures et environnements ont été à l'origine des différents paysages observés sur l'île d'Efate. Les populations sédentaires ont dû faire face aux aléas climatiques, bien que la diversité des traditions et des milieux insulaires complique parfois la détermination des liens entre des changements environnementaux régionaux et des modifications de comportements humains à échelle locale. Nous pouvons faire un parallèle avec la situation actuelle sur les îles, où la population est forcée de se déplacer vers l'intérieur des terres, voire de quitter leur île, en raison de la montée du niveau de la mer liée au réchauffement climatique. Les données issues de cette thèse et d'autres études paléoenvironnementales permettent aux climatologues de tester des simulations tentant de prévoir les prochains changements environnementaux, afin de s'assurer qu'ils reproduisent fidèlement les événements du passé avant de simuler ceux du futur.

Bien que les résultats issus de la quantification climatique soient peu précis et pas complètement exploitables, nous avons pu obtenir des informations qui n'auraient pas pu être apportées avec les diagrammes polliniques seuls, en particulier sur la variabilité climatique et l'impact du Kuwae sur l'environnement. Les calculs ont pu être réalisés et pourront être à nouveau employés lorsque des données météorologiques plus précises seront disponibles.

Pour de futures recherches, il serait souhaitable de réaliser des analyses sédimentologiques et palynologiques à haute résolution sur des carottes prélevées sur deux autres îles du Vanuatu : Santo et Tanna. Santo est la plus grande île de l'archipel, possédant une végétation riche et diversifiée, elle a fait l'objet d'une importante expédition de recensement de la faune et la flore (terrestre comme marine) en 2006 (à l'initiative du Muséum national d'Histoire naturelle, de l'Institut de Recherche pour le développement et de Pro-Natura International). Près de la côte sud de l'île, se trouve aussi de nombreux sites archéologiques, dont le plus ancien du Vanuatu (Galipaud 2000, 2004 ; Galipaud et Swete-Kelly, 2007). Tanna possède un volcan actif, le mont Yasur, la flore et les populations se sont adaptées à cet environnement particulier. Le choix de ces îles, sur un transect nord (Santo) - sud (Tanna) permet aussi de souligner l'effet de la gradation climatique latitudinale sur les environnements. Les données issues de ces carottes pourraient être comparées avec celles d'Efate, afin d'associer une histoire humaine commune à des environnements différents.

Un autre objectif est de poursuivre les datations sur les grains de pollen. La méthode que nous avons employée est longue, mais une datation sur les grains de pollen réduit considérablement les biais liés à la présence de remaniement ou d'éléments allochtones. La mise en place d'une procédure plus rapide que celle utilisée actuellement est examinée. .

La pluie pollinique ne donne pas une image exacte de la végétation, certaines espèces sont sur- ou sous-représentées. Avec les données actuelles que nous possédons sur la relation pluie pollinique-végétation, il nous est impossible pour l'instant de produire un modèle permettant de reconstituer les paysages et les climats passés de façon robuste, à partir des données polliniques. Ce travail, réalisé majoritairement jusqu'à présent pour l'Europe, l'Amérique et l'Afrique, commence à être effectué pour l'Asie et l'Océanie, ainsi qu'à prendre en compte l'influence de l'Homme sur la dynamique de végétation. Mais il demande une importante base de données et la mise en place d'un réseau de climatologues, botanistes, archéologues, paléoenvironmentalistes et modélisateurs (projet LandCover6k, eg. Ellis, 2015, théorie de la « sociocultural niche construction » à l'échelle mondiale). Dans le cas du Vanuatu, il sera nécessaire d'obtenir plus d'informations sur la pluie pollinique (production et dispersion des grains) d'un maximum de taxons, les exigences écologiques des espèces végétales et les paramètres climatiques actuels propre à chaque île.





## Bibliographie

- Aitchison, J., Greenacre, M., 2002. Biplots of compositional data. *Applied Statistics* 51, 375-392.
- Aleman, J.C., Blarquez, O., Bentaleb, I., Bonté, P., Brossier, B., Carcaillet, C., Gond, V., Gourlet-Fleury, S., Kpolita, A., Lefèvre, I., Oslisly, R., Power, M.J., Yongo, O., Bremond, L., Favier, C., 2013. Tracking land-cover changes with sedimentary charcoal in the Afrotropics. *The Holocene* 23, 1853-1862.
- Alemán, M., Figueroa-Fleming, T., Etcheverry, Á., Sührling, S., Ortega-Baes, P., 2013. The explosive pollination mechanism in Papilionoideae (Leguminosae): an analysis with three *Desmodium* species. *Plant Systematics and Evolution* 300, 177-186.
- Allen, J., White, J.P., 1989. The Lapita Homeland: Some new data and an interpretation. *Journal of the Polynesian Society* 98, 129-146.
- Allen, M.S. 2002. Resolving long-term change in Polynesian marine fisheries. *Asian Perspectives* 41,195-202.
- Allen, M.S., 2007. Three millennia of human and sea turtle interactions in Remote Oceania. *Coral Reefs* 26, 959-970.
- Amesbury, J.R., 2007. Mollusk collecting and environmental change during the Prehistoric Period in the Mariana Islands. *Coral Reefs* 26, 947-958.
- Anderson, A.J., 2000. Slow boats from China: Issues in the prehistory of Indo-Pacific seafaring. In: O'Connor, S., Veth, P. (Eds.), *East of Wallace's Line: Studies of Past and Present Maritime Cultures of the Indo-Pacific Region*. Balkema, Rotterdam, pp. 13-50.
- Anderson, A.J., 2002. Faunal Collapse, Landscape Change and Settlement History in Remote Oceania. *World Archaeology* 33, 375-390.
- Anderson, A.J., 2003. Initial dispersal in Remote Oceania: Pattern and explanation. In: Sand, C. (Ed.), *Pacific Archaeology: Assessments and Prospects*. Service des Musées et du Patrimoine de Nouvelle-Calédonie, Nouméa, pp. 71-84.
- Anderson, A.J., 2008. The rat and the octopus: initial human colonization and the prehistoric introduction of domestic animals to Remote Oceania. *Biological Invasions* 11, 1503-1519.
- Anderson, A.J., Chappell, J., Gagan, M., Grove, R., 2006. Prehistoric maritime migration in the Pacific islands: an hypothesis of ENSO forcing. *The Holocene* 16, 1-6.



- Anderson, D.E., Goudie, A.S., Parker, A.G., 2013. Global environments through the Quaternary: exploring environmental change. Oxford University Press, Oxford. 359 p.
- Asami, R., Iryu, Y., Hanawa, K., Miwa, T., Holden, P., Shinjo, R., Paulay, G., 2013. MIS 7 interglacial sea-surface temperature and salinity reconstructions from a southwestern subtropical Pacific coral. *Quaternary Research* 80,575-585.
- Ash, R.P., Carney, J.N., McFarlane, A., 1978. Geology of Efate and Offshore Islands, Mineral Survey Project (JDP 103) New Hebrides Government Geological Survey, Port Vila.
- Athens, J.S., Tuggle, H.D., Ward, J.V., Welch, D.J., 2002. Avifaunal extinctions, vegetation change, and Polynesian impacts in prehistoric Hawai'i. *Archaeology in Oceania* 37, 57-78.
- Backer, C.A., Bakhuizen van den Brink, R.C., 1965. Flora of Java: (Spermatophytes only). Dehra Dun, Bishen Singh Mahendra Pal Singh. 761 p.
- Ballard, C, Wilson, M & Trau, A 2008, Chief Roi Mata's Domain, Island Spirits.
- Barr, C., Tibby, J., Gell, P., Tyler, J., Zawadzki, A., Jacobsen, G.E., 2014. Climate variability in south-eastern Australia over the last 1500 years inferred from the high-resolution diatom records of two crater lakes. *Quaternary Science Reviews* 95, 115-131.
- Bartoli, F., 1981. Le cycle biogéochimique du silicium sur roche acide. Application à deux systèmes forestiers tempérés (Vosges), thèse de Doctorat, Université de Nancy I.
- Barton, H., Matthews, P.J., 2006. Taphonomy. In : Barton, H., Torrence, R. (Eds.), *Ancient Starch Research*, Left Coast Press, Walnut Creek, pp. 75-94.
- Batchelder, R., 1967. Spatial and temporal patterns of fire in the tropical world. Presented at the Proceedings Annual [6th] Tall Timbers Fire Ecology Conference, Tallahassee, USA, pp. 171-207.
- Bedford, S., 2006a. The Pacific's earliest painted pottery: an added layer of intrigue to the Lapita debate and beyond. *Antiquity* 80, 544-557.
- Bedford, S. 2006b. Pieces of the Vanuatu Puzzle: Archaeology of the North, South and centre. *Terra Australis* 23, ANU Press, Canberra. 344 p.
- Bedford, S, 2009. Les traditions potières Erueti et Mangaasi du Vanuatu central : réévaluation et comparaison quarante ans après leur identification initiale. *Journal de la Société des Océanistes* 128, 25-38.

- Bedford, S., Spriggs, M., 2000. Crossing the Pwanmwou: preliminary report on recent excavations adjacent to and south west of Mangaasi, Efate, Vanuatu. *Archaeology in Oceania* 35, 120-126.
- Bedford, S., Spriggs, M., 2007. Northern Vanuatu as a Pacific Crossroads: the Archaeology of Discovery, Interaction and the Emergence of the Ethnographic present. *Asian Perspectives* 47, 95-120.
- Bedford, S., Spriggs, M., 2014. The Archaeology of Vanuatu: 3000 Years of History across Islands of Ash and Coral. *The Oxford Handbook of Prehistoric Oceania*, 1-17.
- Bedford, S., Buckley, H., Valentin, F., Tayles, N., Longga, N.F., 2011. Lapita Burials, a New Lapita Cemetery and Post-Lapita Burials from Malakula, Northern Vanuatu, Southwest Pacific. *Journal of Pacific Archaeology* 2, 26-48.
- Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., Valentin, F., Regenvanu, R., Abong, M., 2010. A cemetery of first settlement: Teouma, South Efate, Vanuatu/Un cimetière de premier peuplement : le site de Teouma, sud d'Efate, Vanuatu. In: Sand, C., Bedford, S. (Eds.), *Lapita: Oceanic Ancestors/Lapita: Ancêtres Océaniens*. Musée du Quai Branly/Somogy, Paris, pp. 140-161.
- Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., 2006. The Teouma Lapita site and the early human settlement of the Pacific Islands. *Antiquity* 80, 812-828.
- Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., McGregor, C., Kuautonga, T., Sietz, M., 2007. The excavation, conservation and reconstruction of Lapita burial pots from the Teouma site, Efate, Central Vanuatu. *Terra Australis* 26, 223-240.
- Bellwood, P., 2005. *First Farmers. The origin of Agricultural Societies*. Blackwell publishings, Hoboken. 384 p.
- Bellwood, P., 2011. Holocene Population History in the Pacific Region as a Model for Worldwide Food Producer Dispersals. *Current Anthropology* 52, S363-S378.
- Bellwood, P., Fox, J., Tryon, D., 1995. The Austronesians in History: Common origins and diverse transformations. In : Bellwood, P., Fox, J., Tryon, D. (Ed.), *The Austronesians: Historical and comparative perspectives*. ANU Press, Canberra, pp. 1-16.
- Beucher, F., 2010. *Météorologie Tropicale : des alizés au cyclone*. Météo France, Paris. 865 p.
- Bentley, R.A., Buckley, H.R., Spriggs, M., Bedford, S., Ottley, C.J., Nowell, G.M., Macpherson, C.G., Pearson, D.G., 2007. Lapita Migrants in the Pacific's Oldest Cemetery: Isotopic Analysis at Teouma, Vanuatu. *American Antiquity* 72, 645-656.

- Biagioni, S., Wündsche, M., Haberzettl, T., Behling, H., 2015. Assessing resilience/sensitivity of tropical mountain rainforests towards climate variability of the last 1500 years: The long-term perspective at Lake Kalimpa (Sulawesi, Indonesia). *Review of Palaeobotany and Palynology* 213, 42-53.
- Blanco, J., Pascal, L., Ramon, L., Vandenbroucke, H., Carrière, S.M., 2013. Agrobiodiversity performance in contrasting island environments: The case of shifting cultivation in Vanuatu, Pacific. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 174, 28-39.
- Blarquez, O., Girardin, M.P., Leys, B., Ali, A.A., Aleman, J.C., Bergeron, Y., Carcaillet, C., 2013. Paleofire reconstruction based on an ensemble-member strategy applied to sedimentary charcoal. *Geophysical Research Letters* 40, 2667-2672.
- Bonnemaïson, J., 1996. Les fondements géographiques d'une identité : l'archipel du Vanuatu. Essai de géographie culturelle, livre 1 : Gens de pirogue et gens de la terre. ORSTOM, Paris. 460 p.
- Botineau, M., 2010. Botanique systématique et appliquée des plantes à fleurs. Lavoisier, Cachan. 1403 p.
- Bourdy, G., Caporalino-Djian, C., 1994. Ethnobotanique à Vanuatu et substances naturelles nématocides. *Rapports de l'ORSTOM, Centre de Nouméa, Sciences de la Vie, Pharmacologie, n° 1, 10994.* 48 p.
- Bowler, J.M., Johnston, H., Olley, J.M., Prescott, J.R., Roberts, R.G., Shawcross, W., Spooner, N.A., 2003. New ages for human occupation and climatic change at Lake Mungo, Australia. *Nature* 421, 837-840.
- Bowman, D.M.J.S., Haberle, S.G., 2010. Paradise burnt: How colonizing humans transform landscapes with fire. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 21234-21235.
- Bradley, R., Jones, P., 1993. Little Ice Age summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene* 3, 367-376.
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Von Storch, H., Luterbacher, J., 2005. Historical Climatology In Europe—The State Of The Art. *Climatic Changes* 70, 363-430.
- Briffa, K.R., Jones, P.D., Schweingruber, F.H., Osborn, T.J., 1998. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* 393, 450-455.

- Brijker, J.M., Jung, S.J.A., Ganssen, G.M., Bickert, T., Kroon, D., 2007. ENSO related decadal scale climate variability from the Indo-Pacific Warm Pool. *Earth and Planetary Science Letters* 253, 67-82.
- Bronk Ramsey, C., Lee, S., 2013. Recent and Planned Developments of the Program OxCal. *Radiocarbon*, 55, 720-730.
- Brown, T.A., Farwell, G.W., Grootes, P.M., Schmidt, F.H., 1992. Radiocarbon AMS dating of pollen extracted from peat samples. *Radiocarbon* 34, 550-556.
- Byrne, C., Dotte-Sarout, E., Winton, V., 2013. Charcoals as indicators of ancient tree and fuel strategies: An application of anthracology in the Australian Midwest. *Australian Archaeology* 77, 94-106.
- Buckley, H.R., 2007. Possible Gouty Arthritis in Lapita-Associated Skeletons from Teouma, Efate Island, Central Vanuatu. *Current Anthropology* 48, 741-749.
- Buckley, H.R., Kinaston, R., Halcrow, S.E., Foster, A., Spriggs, M., Bedford, S., 2014. Scurvy in a tropical paradise? Evaluating the possibility of infant and adult vitamin C deficiency in the Lapita skeletal sample of Teouma, Vanuatu, Pacific islands. *International Journal of Paleopathology* 5, 72-85.
- Bulalacao, L., 1997. Pollen flora of the Philippines, Vol. 1. DOST-TAPI-SPU Technology Application and Promotion Institute, Manille. 266 p.
- Burjachs, F., Expósito, I., 2014. Charcoal and pollen analysis: Examples of Holocene fire dynamics in Mediterranean Iberian Peninsula. *CATENA*.
- Burley, D., Connaughton, S., 2007. First Lapita settlement and its chronology in Vava'u, Kingdom of Tonga. *Radiocarbon* 49, 131-137.
- Cabioch, G., Banks-Culter, K.A., Beck, W.J., Burr, G.S., Corrège, T., Edwards, R.L., Taylor, F.W., 2003. Continuous reef growth during the last 23 cal kyr BP in a tectonically active zone (Vanuatu, SouthwestPacific). *Quaternary Science Reviews* 22, 1771-1786.
- Cabioch, G., Wirmann, D., Sémah, A.-M., Corrège, T., Le Cornec, F., 2008. Évolution des paléoenvironnements dans le Pacifique lors de la dernière déglaciation : exemples en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. *Le Journal de la Société des Océanistes* 126-127, 25-40.
- Carcaillet, C., Bouvier, M., Fréchette, B., Larouche, A.C., Richard, P.J.H., 2001. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene* 11, 467-476.

- Carcaillet, C., Perroux, A.-S., Genries, A., Perrette, Y., 2007. Sedimentary charcoal pattern in a karstic underground lake, Vercors massif, French Alps: implications for palaeo-fire history. *The Holocene* 17, 845-850.
- Carson, M.T., 2008. Correlation of environmental and cultural chronology in New Caledonia. *Geoarchaeology* 23, 695-714.
- Carson, M.T., 2011. Palaeohabitat of first settlement sites 1500–1000 B.C. in Guam, Mariana islands, western Pacific. *Journal of Archaeological Science, Satellite remote sensing in archaeology: past, present and future perspectives* 38, 2207-2221.
- Carson, M.T., 2014. Paleo-Terrain Research: Finding the First Settlement Sites of Remote Oceania. *Geoarchaeology* 29, 268-275.
- Chave, J., 1999. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. *Ecological modelling* 124, 233-254.
- Chiu, S., 2005. Meanings of a Lapita Face: Materialized Social Memory in Ancient House Societies. *Taiwan Journal of Anthropology* 3, 1-47.
- Chiu, S., 2007 Detailed Analysis of Lapita Face Motifs: Case Studies from Reef/Santa Cruz Lapita Sites and New Caledonia Lapita Site 13A. *Terra Australis* 26, 241-264.
- Cillauren, E., David, D., Grandperrin, R., 2002. Atlas des pêcheries côtières de Vanuatu / Coastal fisheries atlas of Vanuatu - Un bilan décennal pour le développement / A 10-year development assessment, IRD-ORSTOM, Bondy. 256 p.
- Clark, G., Anderson, A., 2009. Colonisation and culture change in the early prehistory of Fiji. *The Early Prehistory of Fiji* 31, 407-437.
- Clark, J.S., 1988. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area transport deposition, and sampling. *Quaternary Research* 30, 67-80.
- Clark, J.S., Patterson, W.A., 1997. Background and Local Charcoal in Sediments: Scales of Fire Evidence in the Paleorecord, in: Clark, J.S., Cachier, H., Goldammer, J.G., Stocks, B. (Eds.), *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*, NATO ASI Series. Springer Heidelberg, Berlin, pp. 23-48.
- Clark, R.L., 1982. Point count estimation of charcoal in pollen preparations and thin sections of sediments. *Pollen et Spores* 24, 523-535.
- Clark, R.L., 1984. Effects on charcoal of pollen preparation procedures. *Pollen et Spores* 26, 559-576.
- Clement, A.C., Seager, R., Cane, M.A., 2000. Suppression of El Niño during the Mid-Holocene by changes in the Earth's orbit. *Paleoceanography* 15, 731-737.

- Cobb, K.M., Charles, C.D., Cheng, H., Edwards, R.L., 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* 424, 271-276.
- Cobb, K.M., Westphal, N., Sayani, H.R., Watson, J.T., Lorenzo, E.D., Cheng, H., Edwards, R.L., Charles, C.D., 2013. Highly Variable El Niño–Southern Oscillation Throughout the Holocene. *Science* 339, 67-70.
- Cochrane, E.E., Rivera-Collazo, I.C., Walsh, E., 2011. New Evidence for Variation in Colonisation, Cultural Transmission, and Subsistence from Lapita (2900 BP) to the Historic Period in Southwest Fiji. *Journal of Pacific Archaeology* 2, 40-55.
- Coiffier, C., 2009. « Promesse tenue ». José Garanger et le retour au Vanuatu des objets de la sépulture de Roy Mata. *Journal de la Société des Océanistes* 128, 15-23.
- Cole, L.E.S., Bhagwat, S.A., Willis, K.J., 2015. Long-term disturbance dynamics and resilience of tropical peat swamp forests. *Journal of Ecology* 103, 16-30.
- Cole-Dai, J., Ferris, D.G., Lanciki, A.L., Savarino, J., Thiemens, M.H., McConnell, J.R., 2013. Two likely stratospheric volcanic eruptions in the 1450s C.E. found in a bipolar, subannually dated 800 year ice core record. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 7459–7466.
- Collectif Cirad, 2002. *Mémento de l'agronome*. Editions Quae, Versailles. 1702 p.
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A.F., Krebs, P., 2009. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews* 28, 555-576.
- Conroy, J.L., Overpeck, J.T., Cole, J.E., Shanahan, T.M., Steinitz-Kannan, M., 2008. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record. *Quaternary Science Reviews* 27, 1166–1180.
- Constantine, A., Reepmeyer, C., Bedford, S., Spriggs, M., Ravn, M., 2015. Obsidian distribution from a Lapita cemetery sheds light on its value to past societies: Obsidian distribution from a Lapita cemetery. *Archaeology in Oceania* 50, 111-1116.
- Corrège, T., Delcroix, T., Recy, J., Beck, W., Cabioch, G., Le Cornec, F., 2000. Evidence for stronger El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral. *Paleoceanography* 14, 465-470.
- Cortella, A.R., Pochettino, M.L., 1994. Starch grain analysis as a Microscopic Diagnostic Feature in the Identification of Plant Material. *Economic Botany* 48, 171-181.

- Cour, P., 1974. Nouvelles techniques de détection des flux et retombées polliniques. Étude de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollen et Spores* 6, 103-141.
- Cronquist, A., 1982. *Basic Botany*. Harper & Row, New York. 680 p.
- Crowley, T.J., 2000. Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science* 289, 270-277.
- Crowley, T.J., North, G., 1991. *Paleoclimatology*. Oxford University Press, Oxford. 339 p.
- Crowther, A., 2005. Starch Residues on Undecorated Lapita Pottery from Anir, New Ireland. *Archaeology in Oceania* 40, 62-66.
- Daniau, A.-L., Sanchez Goni, M.F., Martinez, P., Urrego, D.H., Bout-Roumazeilles, V., Desprat, S., Marlon, J.R., 2013. Orbital-scale climate forcing of grassland burning in southern Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 5069-5073.
- Debenay, J.-P., 2012. *A guide to 1,000 foraminifera from Southwestern Pacific: New Caledonia*. IRD, Bondy. 385 p.
- Delhon C., 2005. *Anthropisation et paléoclimats du Tardiglaciaire à l'Holocène en moyenne vallée du Rhône : études pluridisciplinaires des spectres phytolithiques et pédo-anthracologiques de séquences naturelles et de sites archéologiques*. Thèse de Doctorat, Université de Paris 1.
- Dellow, J.J., Motley, K., Storrie, A., Spenceley, J., 2001. *Lippia, Agfact*. ed. NSW Agriculture, Sydney. 5 p.
- Denham, T., Haberle, S., 2008. Agricultural emergence and transformation in the Upper Wahgi valley, Papua New Guinea, during the Holocene: theory, method and practice. *Holocene* 18, 481-496.
- Denniston, R.F., Wyrwoll, K.-H., Victor, J.P., Brown, J.R., Asmerom, Y., Wanamaker Jr., A.D., Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D., Humphreys, W.F., 2013. A Stalagmite record of Holocene Indonesian-Australian summer monsoon variability from the Australian tropics. *Quaternary Science Reviews* 78, 155-168.
- Denniston, R.F., Wyrwoll, K.-H., Victor, J.P., Brown, J.R., Asmerom, Y., Wanamaker Jr., A.D., Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D., Humphreys, W.F., 2014. Corrigendum to "A stalagmite record of Holocene Indonesian-Australian summer monsoon variability from the Australian tropics". *Quaternary Science Reviews* 87, 156-158 [Quat. Sci. Rev. 78 (2013) 155-168].

- Dickinson, W.R., 2001. Paleoshoreline record of relative Holocene sea levels on Pacific islands. *Earth Science Reviews* 55, 191–234.
- Dickinson, W.R., 2003. Impact of mid-Holocene hydro-isostatic highstand in regional sea level on habitability of islands in Pacific Oceania. *Journal of Coastal Research* 19, 489-502.
- Di Piazza, A., Pearthree, E., 2001. An island for gardens, an island for birds and voyaging: a settlement pattern for Kiritimati and Tabuaeran, two “mystery islands” in the Northern Lines, Republic of Kiribati. *The Journal of the Polynesian Society* 110, 149-170.
- Di Piazza, A., Di Piazza, P., Pearthree, E., 2007. Sailing virtual canoes across Oceania: revisiting island accessibility. *Journal of Archaeological Science* 34, 1219-1225.
- Donders, T.H., Haberle, S.G., Hope, G., Wagner, F., Visscher, H., 2007. Pollen evidence for the transition of the Eastern Australian climate system from the post-glacial to the present-day ENSO mode. *Quaternary Science Reviews* 26, 1621-1637.
- Donders, T.H., Wagner-Cremer, F., Visscher, H., 2008. Integration of proxy data and model scenarios for the mid-Holocene onset of modern ENSO variability. *Quaternary Science Reviews* 27, 571-579.
- Donohue, M., Denham, T., 2012. Lapita and Proto-Oceanic. *The Journal of Pacific History* 47, 443-457.
- Dotte-Sarout, E., 2015. Arboriculture in the Pacific and shared horticultural traditions: first insights from a comparison of anthracological case-studies in New Caledonia and French Polynesia. Presented at the Lapita biology, chronology and culture: the 8th international Lapita conference, Port Vila, Vanuatu.
- Dotte-Sarout, E., Sand, C., Ouetcho, J., Bole, J., 2010. “De Milieux en Paysages”. Le rôle des variations climatiques dans les transformations du système socio-écologique en Nouvelle-Calédonie au 2ème millénaire apr. JC: approche archéogéographique. In: Valentin, F., Hardy, M. (Eds.), *Hommes, Milieux et Traditions Dans Le Pacifique Sud*. De Bocard, Paris, pp. 211-228.
- Elliot, M.B., Flenley, J.R., Sutton, D.G., 1998. A late Holocene pollen record of deforestation and environmental change from the Lake Tauanui catchment, Northland, New Zealand. *Journal of Paleolimnology* 19, 23-32..
- Ellis, E.C., 2015. Ecology in an Anthropogenic Biosphere. *Ecological Monographs* 85, 287-331.



- Endress, P.K., 1987. The Chloranthaceae: Reproductive Structures and Phylogenetic Position. Botanisches Museum der Universität Zürich, Zürich. 74 p.
- Erdtman, G. 1952. Pollen Morphology and Plant Taxonomy: Angiosperms. Almqvist and Wiksells, Uppsala. 553 p.
- Erdtman, G., 1960. The acetolysis method, a revised description. Svensk Botanisk Tidskrift 54, 561-564.
- Erdtman, G., 1986. Pollen Morphology and Plant Taxonomy: Angiosperms. Brill Archive, Stockholm. 576 p.
- Estes, J.R., Brown, L., 1973. Entomophilous, intrafloral pollination in *Phyla incisa*. American Journal of Botany 60, 228-230.
- Fall, P.L., 2005. Vegetation change in the coastal-lowland rainforest at Avai'o'vuna Swamp, Vava'u, Kingdom of Tonga. Quaternary Research 64, 451- 459.
- Fall, P.L., 2010. Pollen evidence for plant introductions in a Polynesian tropical island ecosystem, Kingdom of Tonga. Terra Australis 32, 253-271.
- Faegri, K., Iversen, J. 1975. Textbook of pollen analysis, 3rd edition, revised, Munksgaard, Copenhagen. 295 p.
- Fiala, B., Meyer, U., Hashim, R., Maschwitz, U., 2011. Pollination systems in pioneer trees of the genus *Macaranga* (Euphorbiaceae) in Malaysian rainforests. Biological Journal of the Linnean Society 103, 935-953.
- Field, J.S., 2008. Explaining Fortifications in Indo-Padfic Prehistory. Archaeology in Oceania 43, 1-10.
- Field, J.S., Lape, P.V., 2010. Paleoclimates and the emergence of fortifications in the tropical Pacific islands. Journal of Anthropological Archaeology 29, 113-124.
- Field, J.S., Cochrane, E.E., Greenlee, D.M., 2009. Dietary change in Fijian prehistory: isotopic analyses of human and animal skeletal material. Journal of Archaeological Science 36, 1547-1556.
- Firth, C., Handley, H., Cronin, S., Turner, S., 2014. The eruptive history and chemical stratigraphy of a post-caldera, steady-state volcano: Yasur, Vanuatu. Bulletin of Volcanology 76, 837.
- Fitzpatrick, S.M., Callaghan, R.T., 2013. Estimating trajectories of colonisation to the Mariana Islands, western Pacific. Antiquity 87, 840-853.

- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A., Matter, A., 2003. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science* 300, 1737-1739.
- Fletcher, M.-S., Cadd, H.R., Haberle, S.G., 2015. Can we infer vegetation change from peat carbon and nitrogen content? A palaeoecological test from Tasmania, Australia. *The Holocene* 25, 1-9.
- Forestier, H., Guillaud, D., 2005. Des Austronésiens en Asie-Pacifique. Continuités et ruptures sur le chemin des migrations anciennes. *Aséanie* 16, 11-40.
- Foster, A., Buckley, H., Tayles, N., Spriggs, M., Bedford, S., 2015. Gender, Labour Division and the Skeleton: A case study from the Teouma Lapita cemetery. *University of Otago - Studies in Archaeology* 25, 76-90.
- Frogner Kockum, P.C., Herbert, R.B., Gislason, S.R., 2006. A diverse ecosystem response to volcanic aerosols. *Chemical Geology* 231, 57-66.
- Gagan, M.K., Hendy, E.J., Haberle, S.G., Hantoro, W.S., 2004. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern oscillation. *Quaternary International* 118-119, 127-143.
- Galipaud, J.-C., 2000. The Lapita site of Atanoasao, Malo, Vanuatu (Field Report No. 8).
- Galipaud, J.-C., 2004. Settlement History and Landscape Use in Santo, Vanuatu. *Pacific Odyssey, A: Archaeology and Anthropology in the Western Pacific - Papers in Honour of Jim Specht, Records of the Museum, Supplement* 29, 59-64.
- Galipaud, J.-C., Kelly, M.C.S., 2007. Makué (Aore Island, Santo, Vanuatu): A new Lapita site in the ambit of New Britain obsidian distribution. *Terra Australis* 26, 151-162.
- Galipaud, J.-C., Reepmeyer, C., Torrence, R., Kelloway, S., White, P., 2014. Long-distance connections in Vanuatu: new obsidian characterisations for the Makué site, Aore Island. *Archaeology in Oceania* 49, 110-116.
- Ganopolski, A., Rahmstorf, S., Petoukhov, V., Claussen, M., 1998. Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity. *Nature* 391, 351-356.
- Gao, C., Robock, A., Self, S., Witter, J.B., Steffenson, J.P., Clausen, H.B., Siggaard-Andersen, M.-L., Johnsen, S., 2006. The 1452 or 1453 A.D. Kuwae eruption signal derived from multiple ice core records: Greatest volcanic sulfate event of the past 700 years. *Journal of Geophysical Research* 111, D12107.

- Gardner, R.O., 1997. *Macropiper* (Piperaceae) in the south-west Pacific. *New Zealand Journal of Botany* 35, 293–307.
- Garanger, J., 1972. *Archéologie des Nouvelles-Hébrides: contribution à la connaissance des îles du centre*. Publications de la Société des Océanistes, Paris. 629 p.
- Garling, S.J., 2007. *Post-Lapita Evolutions or Revolutions? Interaction and Exchange in Island Melanesia: The View from the Tanga Islands*. Thèse de doctorat, Australian National University, Canberra.
- Gifford, E.W., Shutler, Jr., R., 1956. *Archaeological Excavations in New Caledonia*, University of California press, Berkeley. 148 p.
- Gill, A.M., Hoare, J.R.L., Cheney, N.P., 1990. *Fires and Their Effects in the Wet-Dry Tropics of Australia*. In: Goldammer, D.J.G. (Ed.), *Fire in the Tropical Biota*, Ecological Studies. Springer Heidelberg, Berlin, pp. 159-178.
- Goodwin, I.D., Browning, S., Lorrey, A.M., Mayewski, P.A., Phipps, S.J., Bertler, N.A.N., Edwards, R.P., Cohen, T.J., van Ommen, T., Curran, M., Barr, C., Stager, J.C., 2013. A reconstruction of extratropical Indo-Pacific sea-level pressure patterns during the Medieval Climate Anomaly. *Climate Dynamics* 43, 1197-1219.
- Gosden, C., 1989. Prehistoric social landscape of the Arawe Islands, West New Britain, Papua New Guinea. *Archaeology in Oceania* 24, 45-58.
- Gott, B., Barton, H., Samuel, D., Torrence, R., 2006. *Biology of starch*, In: Barton, H., Torrence, R. (Ed.), *Ancient Starch Research*, Left Coast Press, Walnut Creek, pp. 35-45.
- Goudie, S.A., 2013. *The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future*, Seventh edition. John Wiley & Sons, Chichester. 376 p.
- Green R.C., 1979. *Lapita*, In: Jennings, J. (Ed.), *The Prehistory of Polynesia*. ANU Press, Canberra, pp. 27-60.
- Griffiths, M.L., Drysdale, R.N., Gagan, M.K., Frisia, S., Zhao, J., Ayliffe, L.K., Hantoro, W.S., Hellstrom, J.C., Fischer, M.J., Feng, Y.-X., 2010. Evidence for Holocene changes in Australian–Indonesian monsoon rainfall from stalagmite trace element and stable isotope ratios. *Earth and Planetary Science Letters* 292, 27-38.
- Grinsted A., Moore, J., Jevrejeva, S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics* 34, 461-472.
- Guiart, J., 1966. *Corpus de mythes recueillis dans le centre de l'archipel néohébridais*. Unpublished typescript, held at the Vanuatu National Library.

- Guiart, J., 1973. Le dossier rassemblé. In : Espirat, J-J. (Ed.), *Système des titres électifs ou héréditaires dans les Nouvelles-Hébrides centrales d'Efate aux îles Shepherd*. Institut d'ethnologie, Musée de l'Homme, Paris, pp. 47-365.
- Guillet, B., Planchais, N., 1969. Note sur une technique d'extraction des pollens des sols par une solution dense. *Pollen et Spores* 1, 141-145.
- Haberle, S.G., 2005. A 23,000-yr pollen record from Lake Euramoo, Wet Tropics of NE Queensland, Australia. *Quaternary Research* 64, 343-356.
- Haberle, S.G., Ledru, M.-P., 2001. Correlations among Charcoal Records of Fires from the Past 16,000 Years in Indonesia, Papua New Guinea, and Central and South America. *Quaternary Research* 55, 97-104.
- Haberle, S.G., Hope, G.S., van der Kaars, S., 2001. Biomass burning in Indonesia and Papua New Guinea: natural and human induced fire events in the fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Quaternary Environmental Change in the Indonesian Region* 171, 259-268.
- Haberle, S.G., Lentfer, C., O'Donnell, S., Denham, T., 2012. The palaeoenvironments of Kuk Swamp from the beginnings of agriculture in the highlands of Papua New Guinea. *Quaternary International* 249, 129-139.
- Haslam, M., 2004. The decomposition of starch grains in soils: implications for archaeological residue analyses. *Journal of Archaeological Science* 31, 1715-1734.
- Havinga, A.J., 1984. A 20-year experimental investigation into the differential corrosion susceptibility of pollen and spores in various soil types. *Pollen et spores* 26, 541-558.
- Haywood, J.M., Jones, A., Bellouin, N., Stephenson, D., 2013. Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian rainfall. *Nature Climate Change* 3, 660-665.
- Heim, J., 1971. Étude statistique sur la validité des spectres polliniques provenant d'échantillons de mousses. *Lejeunia, Liège*, 34 p.
- Hicks, S., Tinsley, H., Huusko, A., Jensen, C., Hattestrand, M., Gerasimides, A., Kvavadze, E., 2001. Some comments on spatial variation in arboreal pollen deposition: first records from the Pollen Monitoring Programme (PMP). *Review of Palaeobotany and Palynology* 117, 183-194.
- Hoffmann, A., 2007. Looking to Epi: Further Consequences of the Kuwae Eruption, Central Vanuatu, AD 1452. *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association* 26, 62-71.
- Holloway, Y., 2013. Effects of Cyclone Yasi on Vegetation Communities in the Tully. Report Mission Beach Area.

- Hope, G., Kershaw, A.P., Kaars, S. van der, Xiangjun, S., Liew, P.-M., Heusser, L.E., Takahara, H., McGlone, M., Miyoshi, N., Moss, P.T., 2004. History of vegetation and habitat change in the Austral-Asian region. *Quaternary International* 118-119, 103-126.
- Hope, G., O’Dea, D., Southern, W., 1999. Holocene vegetation in the Western Pacific: alternative records of human impact, in: *The Pacific from 5000 to 2000 BP*. pp. 387-404.
- Hope, G., Stevenson, J., Southern, W., 2009. Vegetation histories from the Fijian Islands: alternative records of human impact. *The Early Prehistory of Fiji*. *Terra Australis* 31, 63-86.
- Hopkins, H.C.F., Bradford, J.C., Donovan, B., Pillon, Y., Munzinger, J., Fogliani, B., 2015. Floral biology of the Cunoniaceae in New Caledonia and the role of insects, birds and geckos as potential pollinators. *Kew Bulletin* 70. 33 p.
- Horrocks, M., 2005. A combined procedure for recovering phytoliths and starch residues from soils, sedimentary deposits and similar materials. *Journal of Archaeological Science* 32, 1169-1175.
- Horrocks, M., Bedford, S., 2005. Microfossil analysis of Lapita deposits in Vanuatu reveals introduced Araceae (aroids). *Archaeology in Oceania* 40, 67-74.
- Horrocks, M., Nunn, P.D., 2007. Evidence for introduced taro (*Colocasia esculenta*) and lesser yam (*Dioscorea esculenta*) in Lapita-era (c. 3050–2500cal.yrBP) deposits from Bourewa, southwest Viti Levu Island, Fiji. *Journal of Archaeological Science* 34, 739-748.
- Horrocks, M., Bedford, S., Spriggs, M., 2009. A short note on banana (*Musa*) phytoliths in Lapita, immediately post-Lapita and modern period archaeological deposits from Vanuatu. *Journal of Archaeological Science* 36, 2048-2054.
- Horrocks, M., Grant-Mackie, J., Matisoo-Smith, E., 2008. Introduced taro (*Colocasia esculenta*) and yams (*Dioscorea* spp.) in Podtanean (2700–1800years BP) deposits from Mé Auré Cave (WMD007), Moindou, New Caledonia. *Journal of Archaeological Science* 35, 169-180.
- Horrocks, M., Marra, M., Baisden, W.T., Flenley, J., Feek, D., Nualart, L.G., Haoa-Cardinali, S., Gorman, T.E., 2013. Pollen, phytoliths, arthropods and high-resolution 14C sampling from Rano Kau, Easter Island: evidence for late Quaternary environments, ant (Formicidae) distributions and human activity. *Journal Paleolimnology* 50, 417-432.
- Hu, C., Henderson, G.M., Huang, J., Xie, S., Sun, Y., Johnson, K.R., 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth Planetary Science Letters* 266, 221-232.

- Hunter-Anderson, R.L., 2013. Savanna anthropogenesis in the Mariana Islands, Micronesia: re-interpreting the palaeoenvironmental data. *Archaeology in Oceania* 44, 125-141.
- Intoh, M., 1999. Cultural contacts between Micronesia and Melanesia. Presented at Conférence Lapita : Le Pacifique de 5000 à 2000 avant le présent : Suppléments à l'histoire d'une colonisation = The Pacific from 5000 to 2000 BP : Colonisation and Transformations, Port Vila, Vanuatu, pp. 407-422.
- Irudhayaraj, D.F., Ramasubbu, R., 2014. The lonely endemic Palni Hills Rudraksha Tree *Elaeocarpus blascoi* Weibel (Magnoliopsida: Malvales: Elaeocarpaceae), Tamil Nadu, India. *Journal of Threatened Taxa* 6, 6473-6476.
- Irwin, G., 1992. *The Prehistoric Exploration and Colonisation of the Pacific*. Cambridge University Press, Cambridge. 240 p.
- Irwin, G., 2008. Pacific Seascapes, Canoe Performance, and a Review of Lapita Voyaging with Regard to Theories of Migration. *Asian Perspectives* 47, 12-27.
- Ishida, C., Kono, M., Sakai, S., 2009. A new pollination system: brood-site pollination by flower bugs in *Macaranga* (Euphorbiaceae). *Annals of Botany* 103, 39-44.
- Jago, L.C.F., Boyd, W.E., 2005. How a wet tropical rainforest copes with repeated volcanic destruction. *Quaternary Research* 64, 399-406.
- Jansen, P.C., Cardon, D. (Eds.), 2005. *Ressources végétales de l'Afrique tropicale - Colorants et Tanins*. PROTA, Wageningen. 240 p.
- Jones, S., Quinn, R.L., 2009. Prehistoric Fijian diet and subsistence: integration of faunal, ethnographic, and stable isotopic evidence from the Lau Island Group. *Journal of Archaeological Science* 36, 2742-2754.
- Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P., 2000. *Botanique systématique: Une perspective phylogénétique*. De Boeck Supérieur, Louvain-La-Neuve. 1428 p.
- Kennedy, J., 2008. Pacific Bananas: Complex Origins, Multiple Dispersals? *Asian Perspectives* 47, 75-94.
- Kershaw, A.P., Bretherton, S.C., van der Kaars, S., 2007. A complete pollen record of the last 230 ka from Lynch's Crater, north-eastern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Environmental History of the Humid Tropics region of north-east Australia* 251, 23-45.

- Khider, D., Stott, L.D., Emile-Geay, J., Thunell, R., Hammond, D.E., 2011. Assessing El Niño Southern Oscillation variability during the past millennium. *Paleoceanography* 26, PA3222.
- Kikuchi, D.W., Lasso, E., Dalling, J.W., Nur, N., 2007. Pollinators and pollen dispersal of *Piper dilatatum* (Piperaceae) on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Tropical Ecology* 23, 603-606.
- Kinaston, R.L., Buckley, H.R., 2013. The stable isotope analysis of prehistoric human diet in the Pacific Islands with an emphasis on Lapita. *Pacific archaeology: documenting the past* 50, 91-107.
- Kinaston, R., Bedford, S., Richards, M., Hawkins, S., Gray, A., Jaouen, K., Valentin, F., Buckley, H., 2014a. Diet and Human Mobility from the Lapita to the Early Historic Period on Uripiv Island, Northeast Malakula, Vanuatu. *PLoS ONE* 9, e104071.
- Kinaston, R., Buckley, H., Valentin, F., Bedford, S., Spriggs, M., Hawkins, S., Herrscher, E., 2014b. Lapita Diet in Remote Oceania: New Stable Isotope Evidence from the 3000-Year-Old Teouma Site, Efate Island, Vanuatu. *PLoS One* 9, e90376.
- Kirch, P.V., 1997. *The Lapita Peoples: Ancestors of the Oceanic World, The Peoples of South-East Asia and the Pacific*. Blackwell publishing, Hoboken, USA. 353 p.
- Kirch, P.V., 2000. *The Lapita Peoples: Ancestors of the Oceanic World*. Wiley-Blackwell, Cambridge. 376 p.
- Kirch, P., Hunt, T., 1988. *Archaeology of the Lapita Cultural Complex: a critical Review*. T. Burke Memorial Washington State Museum, Research Report 5, Seattle. 181 p.
- Lamb, H.H., 1995. *Climate, History and the Modern World*. Routledge, London. 464 p.
- Larson, G., Cucchi, T., Fujita, M., Matisoo-Smith, E., Robins, J., Anderson, A., Rolett, B., Spriggs, M., Dolman, G., Kim, T.-H., Thuy, N.T.D., Randi, E., Doherty, M., Due, R.A., Bollt, R., Djubiantono, T., Griffin, B., Intoh, M., Keane, E., Kirch, P., Li, K.-T., Morwood, M., Pedriña, L.M., Piper, P.J., Rabett, R.J., Shooter, P., Bergh, G.V. den, West, E., Wickler, S., Yuan, J., Cooper, A., Dobney, K., 2007. Phylogeny and ancient DNA of *Sus* provides insights into neolithic expansion in Island Southeast Asia and Oceania. *PNAS* 104, 4834-4839.
- Lebot, V., Cabalion, P., 1986. *Les Kavas de Vanuatu: cultivars de Piper methysticum Forst.* IRD, Bondy. 242 p.
- Lebot, V., Merlin, M., Lindstrom, L., 1997. *Kava: The Pacific Elixir: The Definitive Guide to Its Ethnobotany, History, and Chemistry*. Inner Traditions / Bear & Co, Rochester. 272 p.

- Lebrija-Trejos, E., Meave, J.A., Poorter, L., Pérez-García, E.A., Bongers, F., 2010. Pathways, mechanisms and predictability of vegetation change during tropical dry forest succession. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 12, 267-275.
- Lecolle, J.F., Bokilo, J.E., Bernat, M., 1990. Soulèvement et tectonique de l'île d'Éfaté (Vanuatu) arc insulaire des Nouvelles-Hébrides, au cours du Quaternaire récent. Datations de terrasses soulevées par la méthode U/Th. *Marine Geology* 94, 251-270.
- Ledru, M-P., Sémah, A-M., 1992. Atlas de quelques grains de pollen indonésiens. Littérature grise.
- Lentfer, C., 2009. Building a comparative starch reference collection for Indonesia and its application to palaeoenvironmental and archaeological research. *Terra Australis* 30, 80-101.
- Lentfer, C., Therin, M., 2006. Collecting starch in Papua New Guinea. In: Barton, H., Torrence, R. (Eds.), *Ancient Starch Research*. Left Coast Press, Walnut Creek, pp. 99–102.
- Lentfer, C., Pavlides, C., Specht, J., 2010. Natural and human impacts in a 35 000-year vegetation history in central New Britain, Papua New Guinea. *Quaternary Science Reviews* 29, 3750-3767.
- Lim, S., Ledru, M.-P., Valdez, F., Devillers, B., Houngnon, A., Favier, C., Bremond, L., 2014. Ecological effects of natural hazards and human activities on the Ecuadorian Pacific coast during the late Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 415, 197-209.
- Long, A., Davis, K., De Lanois, J., 1992. Separation and <sup>14</sup>C dating of pure pollen from lake sediments: Nanofossil AMS dating. *Radiocarbon* 34, 557-560.
- Louppe, D., 2008. Ressources végétales de l'Afrique tropicale. *Prota* 7(1) : bois d'oeuvre. PROTA, Wageningen. 785 p.
- Lucy, M., Condamine-Balonne Water Committee, National Landcare Program (N.S.W.), Pittsworth District Landcare, Queensland, Department of Primary Industries, 1995. *Lippia (Phyla canescens): a review of its economic and environmental impact on floodplain ecosystems in the Murray-Darling Basin*. Condamine-Balonne Water Committee, Sydney. 40 p.
- Lynch, A.H., Beringer, J., Kershaw, P., Marshall, A., Mooney, S., Tapper, N., Turney, C., Van Der Kaars, S., 2007. Using the Paleorecord to Evaluate Climate and Fire Interactions in Australia. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35, 215-239.



- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326, 1256-1260.
- Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Daniau, A.-L., Harrison, S.P., Maezumi, S.Y., Power, M.J., Tinner, W., Vanni re, B., 2013. Global biomass burning: a synthesis and review of Holocene paleofire records and their controls. *Quaternary Science Reviews* 65, 5-25.
- Martin, L., Flexor, J.M., 1989. Vibro-testemunhador leve: constru o, utiliza o e possibilidades, in: Publica o Especial N  1. Resumos. Presented at the Congresso da Associa o Brasileira de Estudos do Quatern rio, Rio de Janeiro, pp. 1-2.
- Martin, P.S., Steadman, D.W., 1999. Prehistoric Extinctions on Islands and Continents. In: MacPhee, R.D.E. (Ed.), *Extinctions in Near Time, Advances in Vertebrate Paleobiology*. Springer US, New York, pp. 17-55.
- Masse, W.B., Liston, J., Carucci, J., Athens, J.S., 2006. Evaluating the effects of climate change on environment, resource depletion, and culture in the Palau Islands between AD 1200 and 1600. *Quaternary International* 151, 106-132.
- Matisoo-Smith, E., 2007. Animal translocations, genetic variation, and the human settlement of the Pacific. In: Friedlaender, J.S. (Ed.), *Genes, Language, & Culture History in the Southwest Pacific*. Oxford University Press, New York, pp. 157–169.
- Matisoo-Smith, E., Robins, J., 2008. Mitochondrial DNA evidence for the spread of Pacific rats through Oceania. *Biological Invasions* 11, 1521–1527.
- Matthey, D., Stephens, M., Garcia-Anton, E., Hoffmann, D., Dredge, J.A., Fisher, R.E., Lowry, D., 2011. The Nature of the Medieval Warm Period - Little Ice Age Transition in an Annually Resolved Speleothem Record from Voli Voli Cave, Fiji. Presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, pp. 14.
- McGregor, H.V., Gagan, M.K., 2004. Western Pacific coral  $\delta^{18}\text{O}$  records of anomalous Holocene variability in the El Ni o–Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters* 31, L11204.
- Mcleman, R. 2012. Developments in modelling of climate change-related migration. *Climatic Change* 117, 599-611.
- McRobie, F.H., Stemler, T., Wyrwoll, K.-H., 2015. Transient coupling relationships of the Holocene Australian monsoon. *Quaternary Science Reviews* 121, 120-131.

- Mensing, S.A., Southon, J.R., 1999. A simple method to separate pollen for AMS radiocarbon dating and its application to lacustrine and marine sediments. *Radiocarbon* 41, 1-8.
- Mertz, O., Padoch, C., Fox, J., Cramb, R.A., Leisz, S.J., Lam, N.T., Vien, T.D., 2009. Swidden Change in Southeast Asia: Understanding Causes and Consequences. *Human Ecology* 37, 259-264.
- Millspaugh, S.H., Whitlock, C., Bartlein, P.J., 2000. Variations in fire frequency and climate over the past 17 000 yr in central Yellowstone National Park. *Geology* 28, 211-214.
- Mohtadi, M., Romero, O.E., Kaiser, J., Hebbeln, D., 2007. Cooling of the southern high latitudes during the Medieval Period and its effect on ENSO. *Quaternary Science Reviews* 26, 1055–1066.
- Monzier, M., Robin, C., Eisen, J-P., 1994. Kuwae (~1425 A.D): the forgotten caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59, 207-218.
- Moss, P., Mackenzie, L., Ulm, S., Sloss, C., Rosendahl, D., Petherick, L., Steinberger, L., Wallis, L., Heijnis, H., Petchey, F., Jacobsen, G., 2015. Environmental context for late Holocene human occupation of the South Wellesley Archipelago, Gulf of Carpentaria, northern Australia. *Quaternary International* 385, 136-144.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162-165.
- Munzinger, J., Lowry, P.P., 2011. Principal types of vegetation occurring on Santo. In: Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Eds.), *The natural history of Santo*. Publications scientifiques du muséum, Paris, pp. 76-88.
- Murray, J.W., 2014. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Routledge, Abingdon. 408 p.
- Nalamphun, A., Santisuk, T., Smitinand, T., 1969. The defoliation of teng (*Shorea obtusa* Wall.) and rang (*Pentacme suaveis* A.DC.) at ASRCT Sakaerat Experiment Station (Amphoe Pak Thong Chai, Changwat Nakhon Ratchasima). Report 27/8.
- Neef, G., Veeh, H.H., 1977. Uranium series ages and Late Quaternary uplift in the New Hebrides. *Nature* 420, 682-683.

- Newnham, R.M., Vandergoes, M.J., Garnett, M.H., Lowe, D.J., Prior, C., Almond, P.C., 2007. Test of AMS 14C dating of pollen concentrates using tephrochronology. *Journal of Quaternary Science* 22, 37-51.
- Nichols, G.J., Cripps, J.A., Collinson, M.E., Scott, A.C., 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164, 43-56.
- Nunn, Nathan, 2005. Relationship-Specificity, Incomplete Contracts and the Pattern of Trade. PhD thesis, University of British Columbia.
- Nunn, P.D., 2012. Disruption of coastal societies in the Pacific Islands from rapid sea-level fall about AD 1300: new evidence from northern Viti Levu Island, Fiji. *Journal of Coastal Conservation* 16, 199-209.
- Nunn, P.D., Carson, M.T., 2015. Sea-level fall implicated in profound societal change about 2570 cal yr BP (620 BC) in western Pacific islands groups. *Geography and Environment* 2, 17-32.
- Nunn, P.D., Hunter-Anderson, R., Carson, M.T., Thomas, F., Ulm, S., Rowland, M.J., 2007. Times of Plenty, Times of Less: Last-Millennium Societal Disruption in the Pacific Basin. *Human Ecology* 35, 385-401.
- Osmond, M., 1998. Horticultural practices. In: Ross, M., Pawley, A., Osmond, M. (Eds.), *The Lexicon of Proto Oceanic: The Culture and Environment of Ancestral Oceanic Society, I:Material Culture*. Pacific Linguistics, Canberra, pp. 67-114.
- Padoch, C., Pinedo-Vasquez, M., 2010. Saving Slash-and-Burn to Save Biodiversity. *Biotropica* 42, 550-552.
- Pang, K. D., 1993. Climatic impact of the mid-fifteenth century Kuwae caldera formation, as reconstructed from historical and proxy data. *Eos Transaction AGU* 74, 106.
- Parr, J.F., Boyd, W.E., Harriott, V., Torrence, R., 2009. Human Adaptive Responses to Catastrophic Landscape Disruptions During the Holocene at Numundo, PNG. *Geographical Research* 47, 155-174.
- Partin, J.W., Cobb, K.M., Adkins, J.F., Clark, B., Fernandez, D.P., 2007. Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum. *Nature* 449, 452-455.
- Partin, J.W., Quinn, T.M., Shen, C.C., Emile-Geay, J., Taylor, F.W., Maupin, C.R., Lln, K., Jackson, C.S., Banner, J.L., Sinclair, D.J., Huh, C.-A., 2013. Multidecadal rainfall variability

in South Pacific Convergence Zone as revealed by stalagmite geochemistry. *Geology* 41, 1143-1146.

- Patterson, W.A., Edwards, K.J., Maguire, D.J., 1987. Microscopic Charcoal as a Fossil Indicator of Fire. *Quaternary Science Reviews* 6, 3-23.

-Pawley, A., 2007. The origins of Early Lapita culture: the testimony of historical linguistics. *Terra Australis* 26, 17-50.

- Pearl, F.B., 2006. Late Holocene landscape evolution and land-use expansion in Tutuila, American Samoa. *Asian Perspectives* 48-68.

- Pesson, P., Louveaux, J., 1984. *Pollinisation et productions végétales*. Éditions Quae, Versailles. 706 p.

- Petchey, F., Spriggs, M., Bedford, S., Valentin, F., Buckley, H., 2014. Radiocarbon dating of burials from the Teouma Lapita cemetery, Efate, Vanuatu. *Journal of Archaeological Science* 50, 227-242.

- Picornell Gelabert, L., Asouti, A., Allué Martí, E., 2011. The ethnoarchaeology of firewood management in the Fang villages of Equatorial Guinea, central Africa: Implications for the interpretation of wood fuel remains from archaeological sites. *Journal of Anthropological Archaeology* 30, 375-384.

- Pineda, R., Galipaud, J.-C., 1998. Évidences archéologiques d'une surrection différentielle de l'île de Malo (archipel du Vanuatu) au cours de l'Holocène récent. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, Series IIa* 327,777-779.

- Piperno, D.R., 2006. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. Rowman Altamira, Lanham. 252 p.

- Piperno, D.R., Holst, I., 1998. The Presence of Starch Grains on Prehistoric Stone Tools from the Humid Neotropics: Indications of Early Tuber Use and Agriculture in Panama. *Journal of Archaeological Science* 25, 765-776.

- Plummer, C.T., Curran, M.A.J., van Ommen, T.D., Rasmussen, S.O., Moy, A.D., Vance, T.R., Clausen, H.B., Vinther, B.M., Mayewski, P.A., 2012. An independently dated 2000-yr volcanic record from Law Dome, East Antarctica, including a new perspective on the dating of the c. 1450s eruption of Kuwae, Vanuatu. *Climate of the Past Discussions* 8, 1567-1590.

- Pope, K.O., Terrell, J.E., 2007. Environmental setting of human migrations in the circum-Pacific region. *Journal of Biogeography* 35, 1-21.

- Power, M.J., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P.J., Harrison, S.P., Mayle, F.E., Ballouche, A., Bradshaw, R.H.W., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P.I., Prentice, I.C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Ali, A.A., Anderson, R.S., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K.J., Brunelle, A., Bush, M., Camill, P., Chu, G.Q., Clark, J., Colombaroli, D., Connor, S., Daniau, A.-L., Daniels, M., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M.E., Finsinger, W., Foster, D., Frechette, J., Gaillard, M.-J., Gavin, D.G., Gobet, E., Haberle, S., Hallett, D.J., Higuera, P., Hope, G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z.C., Larsen, C., Long, C.J., Lynch, J., Lynch, E.A., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Nelson, D.M., New, J., Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P.J.H., Rowe, C., Sanchez Goñi, M.F., Shuman, B.N., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Urrego-Sanchez, D.H., Umbanhowar, C., Vandergoes, M., Vanniére, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J., Zhang, J.H., 2008. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics* 30, 887-907.
- Prebble, M., Wilmshurst, J.M., 2009. Detecting the initial impact of humans and introduced species on island environments in Remote Oceania using palaeoecology. *Biological Invasions* 11, 1529-1556.
- Proske, U., Haberle, S.G., 2012. Island ecosystem and biodiversity dynamics in northeastern Australia during the Holocene: Unravelling short-term impacts and long-term drivers. *The Holocene* 22, 1097-1111.
- Proske, U., Wood, R., Fallon, S., Stevenson, J., 2015. Use of heavy liquid density separation to remove pyrite from sediment samples for radiocarbon dating. *Quaternary Geochronology* 25, 66-71.
- Punt, W., Hoen, P.P., Blackmore, S., Nilsson, S., Le Thomas, A., 2007. Glossary of pollen and spore terminology. *Review of Palaeobotany and Palynology* 143, 1-81.
- Quantin, P., 1972-1977. Atlas des sols et de quelques données du milieu naturel – Archipel des Nouvelles Hébrides. ORSTOM, Paris.
- Rasmussen, M., Guo, X., Wang, Y., Lohmueller, K.E., Rasmussen, S., Albrechtsen, A., Skotte, L., Lindgreen, S., Metspalu, M., Jombart, T., Kivisild, T., Zhai, W., Eriksson, A., Manica, A., Orlando, L., Vega, F.M.D.L., Tridico, S., Metspalu, E., Nielsen, K., Ávila-Arcos, M.C., Moreno-Mayar, J.V., Muller, C., Dortch, J., Gilbert, M.T.P., Lund, O., Wesolowska, A., Karmin, M., Weinert, L.A., Wang, B., Li, J., Tai, S., Xiao, F., Hanihara, T., Driem, G. van, Jha, A.R., Ricaut, F.-X., Knijff, P. de, Migliano, A.B., Romero, I.G., Kristiansen, K., Lambert, D.M.,

- Brunak, S., Forster, P., Brinkmann, B., Nehlich, O., Bunce, M., Richards, M., Gupta, R., Bustamante, C.D., Krogh, A., Foley, R.A., Lahr, M.M., Balloux, F., Slicheritz-Pontén, T., Villems, R., Nielsen, R., Wang, J., Willerslev, E., 2011. An Aboriginal Australian Genome Reveals Separate Human Dispersals into Asia. *Science* 334, 94-98.
- Rasplus, J-Y., Harry, M., Perrin, H., Chassagnard, M-T., Lachaise, D., 2003. Les Ficus (Moraceae) et l'entomofaune des figues (Hym. Agaonidae, Pteromalidae, Torymidae, Eurytomidae; Dipt. Drosophilidae; Col. Curculionidae) du mont Nimba en Guinée. In: Lamotte, M., Roy, R. (Eds.), *Le Peuplement Animal du Mont Nimba (Guinée, Côte d'Ivoire, Liberia)*. Mémoires du Muséum d'Histoire Naturelle, Publications scientifiques du Muséum, Paris, pp. 107-182.
  - Raven, J.A., 1983. The transport and function of silicon in plants. *Biological Reviews* 58, 179-207.
  - Reepmeyer, C., Clark, G., 2010. Post-colonization interaction between Vanuatu and Fiji reconsidered: the re-analysis of obsidian from Lakeba Island, Fiji. *Archaeometry* 52, 1-18.
  - Rein, B., Lückge, A., Sirocko, F., 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophysical Research Letters* 31, L17211.
  - Rerkasem, K., Lawrence, D., Padoch, C., Schmidt-Vogt, D., Ziegler, A.D., Bruun, T.B., 2009. Consequences of Swidden Transitions for Crop and Fallow Biodiversity in Southeast Asia. *Human Ecology* 37, 347-360.
  - Rees, A.B.H., Cwynar, L.C., Fletcher, M.-S., 2015. Southern Westerly Winds submit to the ENSO regime: A multiproxy paleohydrology record from Lake Dobson, Tasmania. *Quaternary Science Reviews* 126, 254-263.
  - Renssen, H., Goosse, H., Fichefet, T., Masson-Delmotte, V., Koç, N., 2005. Holocene climate evolution in the high-latitude Southern Hemisphere simulated by a coupled atmosphere-sea ice-ocean-vegetation model. *The Holocene* 15, 951-964.
  - Robin, C., Ehen, J.-P., Monzier, M., 1993. Giant tuff cone and 12-km-wide associated caldera at Ambrym Volcano (Vanuatu, New Hebrides Arc). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55, 225-238.
  - Robock, A., 2002. Volcanic eruption and temperature south hemisphere. In: Chambers, F., Ogle, M. (Eds.), *Climate Change: Critical Concepts in the Environment*. Taylor & Francis, Abingdon, pp. 305-327.

- Rovner, I., 1988. Macro- and Micro-ecological Reconstruction Using Plant Opal Phytolith Data from Archaeological Sediments. *Geoarchaeology* 3, 155-163.
- Rowe, C., 2014. Late Holocene swamp transition in the Torres Strait, northern tropical Australia. *Quaternary International* 385, 56-68.
- Rowe, C., McNiven, I.J., David, B., Richards, T., Leavesley, M., 2013. Holocene pollen records from Caution Bay, southern mainland Papua New Guinea. *The Holocene* 23, 1130-1142.
- Sand, C., 2010. Lapita calédonien : Archéologie d'un premier peuplement insulaire océanien. Société des Océanistes, Paris. 296 p.
- Sand, C., Bolé, J., Ouetcho, A., 1996. Le début du peuplement austronésien de la Nouvelle-Calédonie, Les Cahiers de l'Archéologie en Nouvelle-Calédonie. Service des Musées et du Patrimoine, Nouméa. 162 p.
- Sandweiss, D.H., Maasch, K.A., Burger, R.L., Richardson, J.B., Rollins, H.B., Clement, A., 2001. Variation in Holocene El Niño frequencies: Climate records and cultural consequences in ancient Peru. *Geology* 29, 603-606.
- Sangster, A.G., Hodson, M.J., 1992. Silica deposition in subterranean organs. In : Rapp, G., Jr., Mulholland, S.C., (Eds.), *Phytolith Systematics - Emerging Issues. Advances in Archaeological and Museum Science* 1, Plenum Press, New York, pp. 239-251.
- Sauer, J.D., 1962. Effects of Recent Tropical Cyclones on the Coastal Vegetation of Mauritius. *Journal of Ecology* 50, 275-290.
- Schmid, M., 1987. Conditions d'évolution et caractéristiques du peuplement végétal insulaire en Mélanésie occidentale : Nouvelle-Calédonie, Vanuatu. *Bulletin de la Société de Zoologie Française* 112, 233-254.
- Schnell, R., 1970. Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux: Les milieux. Les groupements végétaux. Gauthier-Villars, Paris. 951 p.
- Schölzel, C., 2005. Palaeoenvironmental Transfer Functions in a Bayesian Framework with Application to Holocene Climate Variability in the Near East. Thèse de doctorat, Université de Bonn, Meteorologische Abhandlungen.
- Scott, A.C., 2000. The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164, 281-329.
- Scott, R.M., Buckley, H.R., Spriggs, M., Valentin, F., Bedford, S., 2010. Identification of the first reported Lapita cremation in the Pacific Islands using archaeological, forensic and contemporary burning evidence. *Journal of Archaeological Science* 37, 901-909.

- Scott, A.C., 2009. Forest fire in the fossil record. In : Cerdà, A., Robichaud, P. (Eds.), Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers Inc., NH, pp. 1-37.
- Sear, C.B., Kelly, P.M., Jones, P.D., Goodess, C.M., 1987. Global surface-temperature responses to major volcanic eruptions. *Nature* 330, 365-367.
- Seeto, J., Nunn, P.D., Sanjana, S., 2012. Human-Mediated Prehistoric Marine Extinction in the Tropical Pacific? Understanding the Presence of *Hippopus hippopus* (Linn. 1758) in Ancient Shell Middens on the Rove Peninsula, Southwest Viti Levu Island, Fiji. *Geoarchaeology* 27, 2-17.
- Sémah, A.-M., Wirmann, D., 2006. Mission Vanuatu - du 9 septembre au 2 décembre 2005 (Rapport de missions No. 67), Sciences de la Terre Géologie-Géophysique, IRD.
- Sharma, R.A., Singh, R., 2013. A Review on *Phyla nodiflora* Linn.: A Wild Wetland Medicinal Herb. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research* 20, 57-63.
- Shutler, M.E., Shutler, Jr., R., Bedford, S., 2002. Further detail on the Archaeological Explorations in the Southern New Hebrides, 1963–1964. In: Bedford, S., Sand, C. and D. Burley, D. (Ed.), *Fifty Years in the Field: Essays in Honour and Celebration of Richard Shutler Jrs Archaeological Career*. New Zealand Archaeological Association, Auckland, pp.189-206.
- Siméoni, P., 2009. Atlas du Vanouatou (Vanuatu). Géo-consulte, Port Vila. 39 p.
- Simmonds, N.W., 1959. Bananas. Longmans, Green and Co., London. 466 pp.
- Sittler, C., 1955, *Méthodes et techniques physico-chimiques de préparation des sédiments en vue de leur analyse pollinique*. *Revue de l'Institut français du Pétrole* X, 103-114.
- Slik, J.F., Keßler, P.J., van Welzen, P.C., 2003. Macaranga and Mallotus species (Euphorbiaceae) as indicators for disturbance in the mixed lowland dipterocarp forest of East Kalimantan (Indonesia). *Ecological Indicators* 2, 311-324.
- Smith, A.C., 1979. *Flora vitiensis nova*. Pacific tropical botanical garden, Honolulu. 3166 p.
- Soares, P., Rito, T., Trejaut, J., Mormina, M., Hill, C., Tinkler-Hundal, E., Braid, M., Clarke, D.J., Loo, J.-H., Thomson, N., Denham, T., Donohue, M., Macaulay, V., Lin, M., Oppenheimer, S., Richards, M.B., 2011. Ancient Voyaging and Polynesian Origins. *The American Journal of Human Genetics* 88, 239–247.
- Specht, J., 2007. Small islands in the big picture: the formative period of Lapita in the Bismarck Archipelago. *Terra Australis* 26, 51-70.



- Spriggs, M., 1990. The changing face of Lapita: Transformation of a design. In: Spriggs, M. (Ed.), *Lapita Design, Form and Composition*. Department of Prehistory Research school of Pacific Studies, Australian National University, Canberra, pp. 83-122.
- Spriggs, M., 1997. *The Island Melanesians*. Blackwell publishings, Hoboken. 326 p.
- Spriggs, M., 2004. Is there Life after Lapita, and do you remember the 60s? The Post-Lapita sequences of the Western Pacific. In: Attenbrow, V., Fullager, R. (Eds.), *A Pacific Odyssey: Archaeology and Anthropology in the Western Pacific*. Papers in Honor of Jim Specht. Sydney, pp. 139-144.
- Spriggs, M., 2006. World Heritage Values for the Roi Mata-Mangaasi Site Complex, Northwest Efate, Vanuatu. Unpublished report for the Vanuatu Cultural Centre, Port Vila.
- Spriggs, M., 2010. Geomorphic and archaeological consequences of human arrival and agricultural expansion on Pacific Islands: a reconsideration after 30 years of debate. *Altered Ecologies: Fire, climate and human influence on terrestrial landscapes*. *Terra Australis* 32, 239-252.
- Steinke, S., Mohtadi, M., Prange, M., Varma, V., Pittauerova, D., Fischer, H.W., 2014. Mid-to Late-Holocene Australian-Indonesian summer monsoon variability. *Quaternary Science Reviews* 93, 142-154.
- Stevenson, J., 2004. A late-Holocene record of human impact from the southwest coast of New Caledonia. *The Holocene* 14, 888-898.
- Stevenson, J., Dodson, J.R., Prosser, I.P., 2001. A late Quaternary record of environmental change and human impact from New Caledonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 168, 97-123.
- Stevenson, J., Hope, G., 2005. A comparison of late Quaternary forest changes in New Caledonia and northeastern Australia. *Quaternary Research* 64, 372-383.
- Storey, A.A., Ladefoged, T., Matisoo-Smith, E.A., 2008. Counting your chickens: density and distribution of chicken remains in archaeological sites of Oceania. *International Journal of Osteoarchaeology* 18, 240-261.
- Storey, A.A., Spriggs, M., Bedford, S., Hawkins, S.C., Robins, J.H., Huynen, L., Matisoo-Smith, E., 2010. Mitochondrial DNA from 3000-year old chickens at the Teouma site, Vanuatu. *Journal of Archaeological Science* 37, 2459-2468.
- Stott, P.A., Allen, M., Christidis, N., Dole, R., Hoerling, M., Huntingford, C., Pall, P., Perlwitz, J., Stone, D., 2011. Attribution of Weather and Climate-Related Extreme Events. Presented at the WCRP OSC Climate Research in Service to Society, Denver, pp. 1-44.

- Summerhayes, G.R., Leavesley, M., Fairbairn, A., 2009. Impact of Human Colonization on the Landscape: A View from the Western Pacific <sup>1</sup>. *Pacific Science* 63, 725-745.
- Summerhayes, G., Matisoo-Smith, E., Mandui, H., Allen, J., Specht, J., Hogg, N., McPherson, S., 2010. Tamuarawai (EQS): An Early Lapita Site on Emirau, New Ireland, PNG. *Journal of Pacific Archaeology* 1, 62-75.
- Tennant, R.K., Jones, R.T., Brock, F., Cook, C., Turney, C.S.M., Love, J., Lee, R., 2013. A new flow cytometry method enabling rapid purification of fossil pollen from terrestrial sediments for AMS radiocarbon dating. *Journal Quaternary Science* 28, 229-236.
- Thomson, V.A., Lebrasseur, O., Austin, J.J., Hunt, T.L., Burney, D.A., Denham, T., Rawlence, N.J., Wood, J.R., Gongora, J., Flink, L.G., Linderholm, A., Dobney, K., Larson, G., Cooper, A., 2014. Using ancient DNA to study the origins and dispersal of ancestral Polynesian chickens across the Pacific. *PNAS* 111, 4826–4831.
- Tomlinson, P.B., 1994. *The Botany of Mangroves*. Cambridge University Press, Cambridge. 440 p.
- Torrence, R., 2012. Volcanic disasters and agricultural intensification: A case study from the Willaumez Peninsula, Papua New Guinea. *Quaternary International, Long-term perspectives on human occupation of tropical rainforests* 249, 151-161.
- Trenberth, K.E., Dai, A., 2007. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters* 34.
- Turney, C.S.M., Kershaw, A.P., Moss, P., Bird, M.I., Fifield, L.K., Cresswell, R.G., Santos, G.M., Di Tada, M.L., Hausladen, P.A., Zhou, Y., 2001. Redating the onset of burning at Lynch's Crater (North Queensland): implications for human settlement in Australia. *Journal of Quaternary Science* 16, 767–771.
- Umbanhowar, C.E., Mcgrath, M.J., 1998. Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses. *The Holocene* 8, 341-346.
- Valentin, F., Bedford, S., Buckley, H.R., Spriggs, M., 2010a. Lapita Burial Practices: Evidence for Complex Body and Bone Treatment at the Teouma Cemetery, Vanuatu, Southwest Pacific. *The Journal of Island and Coastal Archaeology* 5, 212-235.
- Valentin, F., Bocherens, H., Gratuze, B., Sand, C., 2006. Dietary patterns during the late prehistoric/historic period in Cikobia island (Fiji): insights from stable isotopes and dental pathologies. *Journal of Archaeological Science* 33, 1396-1410.
- Valentin, F., Buckley, H.R., Herrscher, E., Kinaston, R., Bedford, S., Spriggs, M., Hawkins, S., Neal, K., 2010b. Lapita subsistence strategies and food consumption patterns in the

- community of Teouma (Efate, Vanuatu). *Journal of Archaeological Science* 37, 1820-1829.
- Valentin, F., Choi, J., Lin, H., Bedford, S., Spriggs, M., 2015. Three-thousand-year-old jar-burials at the Teouma cemetery (Vanuatu): A Southeast Asian – Lapita connection? In: Sand, C., Chiu, S., Hogg, N. (Eds.), *The Lapita Cultural Complex in Time and Space: Expansion Routes, Chronologies and Typologies*, *Archeologia Pasifika*, Nouméa. pp. 81–101.
  - Valentin, F., Herrscher, E., Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., 2014. Evidence for Social and Cultural Change in Central Vanuatu Between 3000 and 2000 BP: Comparing Funerary and Dietary Patterns of the First and Later Generations at Teouma, Efate. *The Journal of Island and Coastal Archaeology* 9, 381-399.
  - Valentin, F., Spriggs, M., Bedford, S., Buckley, H., 2011. Vanuatu Mortuary Practices over Three Millennia: Lapita to the Early European Contact Period. *Journal of Pacific Archaeology* 2, 49-65.
  - Vance, T.R., van Ommen, T.D., Curran, M.A.J., Plummer, C.T., Moy, A.D., 2012. A Millennial Proxy Record of ENSO and Eastern Australian Rainfall from the Law Dome Ice Core, East Antarctica. *Journal of Climate* 26, 710-725.
  - Vandergoes, M.J., Prior, C.A., 2003. AMS dating of pollen concentrates; a methodological study of late Quaternary sediments from south Westland, New Zealand. *Radiocarbon* 45, 479-491.
  - Van Der Kaars, S., Tapper, N., Cook, E.J., 2010. Observed relationships between El Niño-Southern Oscillation, rainfall variability and vegetation and fire history on Halmahera, Maluku, Indonesia. *Global Change Biology* 16, 1705-1714.
  - Vanniere, B., 2001. Feu, agro-pastoralisme et dynamiques environnementales en France durant l'Holocène. Analyse du signal incendie, approches sédimentologiques et études de cas en Berry, Pyrénées et Franche-Comté = Fire, land use history and climate changes in France during the Holocene. Charcoal content and sedimentological analysis in Berry, Pyrenees and Jura. Thèse de de doctorat, Institut national agronomique.
  - Van Trease, H., 1995. *La politique Melanesienne: Stael Blong Vanuatu*. Macmillian Brown Centre for Pacific studies and Institute of Pacific studies, Canterbury. 532 p.
  - Veblen, T.T., Kitzberger, T., 2002. Inter-hemispheric comparison of fire history: The Colorado Front Range, U.S.A., and the Northern Patagonian Andes, Argentina. *Plant Ecology* 163, 187-207.

- Walter, A., Lebot, V., Sam, C., 2003. Jardins d'Océanie. IRD, Paris. 326 p.
- Wang, T.L., Bogracheva, T.Y., Hedley, C.L., 1998. Starch: as simple as A, B, C? *Journal of Experimental Botany* 49, 481-502.
- Wang'ondou, V.W., Kairo, J.G., Kinyamario, J.I., Mwaura, F.B., Bosire, J.O., Dahdouh-Guebas, F., Koedam, N., 2013. Vegetative and reproductive phenological traits of *Rhizophora mucronata* Lamk. and *Sonneratia alba* Sm. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208, 522-531.
- Wanner, H., Bütikofer, J., 2008. Holocene Bond cycles : real or imaginary ? *Geografie-Sborník CGS* 4, 338-350.
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joss, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M., 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews* 27, 1791-1828.
- Ward, G.K., 1979. Prehistoric Settlement and Economy of a Tropical Small Island Environment: The Banks Islands, Insular Melanesia. Thèse de doctorat, Australian National University.
- Wheatley, J.I., 1992. A guide to the common trees of Vanuatu, The Republic of Vanuatu's Department of Forestry, Port Vila. 308 p.
- White, J.P., Allen, J., 1980. Melanesian prehistory: Some recent advances. *Science* 207, 728-734.
- Whitlock, C., Larsen, C., 2001. Charcoal as a fire proxy. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 75-97.
- Whitlock, C., Higuera, P.E., McWethy, D.B., Briles, C.E., 2010. Paleoecological perspectives on fire ecology: revisiting the fire-regime concept. *The Open Ecology Journal* 3, 6-23.
- Wickler, S.M., Spriggs, M., 1988. Pleistocene human occupation of the Solomon Islands, Melanesia. *Antiquity* 62, 703-706.
- Williams, M., Cook, E., van der Kaars, S., Barrows, T., Shulmeister, J., Kershaw, P., 2009. Glacial and deglacial climatic patterns in Australia and surrounding regions from 35 000 to 10 000 years ago reconstructed from terrestrial and near-shore proxy data. *Quaternary Science Reviews* 28, 2398-2419.

- Wilson, M., 2002. *Picturing Pacific Prehistory: the rock-art of Vanuatu in a western Pacific context*. Thèse de doctorat, Australian National University.
- Wilson, M., Ballard, C., Kalotiti, D., 2007. Chief Roi Mata's Domain: Challenges facing a World Heritage-nominated property in Vanuatu. A paper presented to the session on "Cultural Heritage Management in the Pacific" at ICOMOS 2007, Cairns, 21 July 2007, 2-9.
- Wirmann, D., Eagar, S.H., Harper, M.A., Leroy, É., Sémah, A.-M., 2011a. First insights into mid-Holocene environmental change in central Vanuatu inferred from a terrestrial record from Emaotfer Swamp, Efate Island. *Quaternary Science Reviews* 30, 3908-3924.
- Wirmann, D., Sémah, A.-M., Chacornac-Rault, M., 2006. Late Holocene paleoenvironment in northern New Caledonia, southwestern Pacific, from a multiproxy analysis of lake sediments. *Quaternary Research* 66, 213-232.
- Wirmann, D., Sémah, A.-M., Debenay, J.-P., Chacornac-Rault, M., 2011b. Mid- to late Holocene environmental and climatic changes in New Caledonia, southwest tropical Pacific, inferred from the littoral plain Gouaro-Déva. *Quaternary Research* 76, 229-242.
- Witter, J.B., Self, S., 2006. The Kuwae (Vanuatu) eruption of AD 1452: Potential magnitude and volatile release. *Bulletin of Volcanology* 68, 1-18.
- Wollstein, A., Lao, O., Becker, C., Brauer, S., Trent, R.J., Nürnberg, P., Stoneking, M., Kayser, M., 2010. Demographic History of Oceania Inferred from Genome-wide Data. *Current Biology* 20, 1983-1992.
- Woodroffea, S., Horton, B., 2005. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific. *Journal of Asian Earth Science* 25, 29-43.
- Worthy, T.H., Hawkins, S., Bedford, S., Spriggs, M., 2015. Avifauna from the Teouma Lapita Site, Efate Island, Vanuatu, including a New Genus and Species of Megapode. *Pacific Science* 69, 205-254.
- Wyrтки, K., 1989. Some thoughts about the west Pacific warm pool. Presented at Western Pacific international meeting and workshop on Toga Coare, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, pp. 99-100.
- Yan, H., Sun, L., Wang, Y., Huang, W., Qiu, S., Yang, C., 2011. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2,000 years from precipitation proxies. *Nature Geoscience* 4, 611-614.
- Zetzsche, F., Kälin, O., 1931. Untersuchungen über die Membran der Sporen und Pollen V. 4. Zur Autoxydation der Sporopollenine. *Helvetica Chimica Acta* 14, 517-519.

- Zhou, W., Zhou, J., Xiao, J., Donahue, D., Jull, A.J.T., 1999. Preliminary study on radiocarbon AMS dating of pollen. *Science in China Serie D: earth Sciences* 42, 524-530.

## Résumé

Les premières migrations ont atteint la région de l'Océanie Lointaine (à l'est des îles Salomon) récemment, autour de 3000 ans BP. De nombreux éléments sont à prendre en compte dans ce processus de déplacement de populations, dont les changements environnementaux. L'installation de l'Homme sur des îles vierges a probablement influencé la faune et la flore insulaires, mais la réponse de la végétation face à la pression anthropique varie d'un site étudié à un autre.

Les objectifs de cette recherche ont été de décrire l'influence humaine sur l'environnement depuis les premières migrations, de déterminer l'impact climatique sur ces déplacements de populations et sur la modification des paysages au cours de l'Holocène supérieur ; puis, de caractériser le comportement humain et son adaptation à une île vierge. Pour répondre à cette problématique, deux carottes palustres, prélevées sur l'île d'Efate (au centre du Vanuatu) ont été étudiées : le marais d'Emaotfer et le lac Otas. Afin d'identifier la paléovégétation arborée et herbacée présente autour des sites, j'ai principalement analysé les grains de pollen et les micro-charbons. J'ai également reconstitué les températures et les précipitations passées à l'aide de fonctions de densité de probabilité.

Au niveau climatique, ces analyses mettent en évidence une période chaude et humide jusqu'à 3700 ans cal BP. Ensuite, un environnement plus sec se met en place, suite à une augmentation de l'ampleur et du nombre d'évènements El Niño. Entre 1950 et 750-600 ans cal BP, les résultats révèlent un climat plus humide, associé à la diminution de fréquence et d'intensité des El Niño. Les modifications de la végétation du marais d'Emaotfer et du lac Otas illustrent une nouvelle période sèche après 750-600 ans cal BP, que l'on peut associer au Petit Âge Glaciaire.

Les populations Lapita ont atteint l'île d'Efate vers 3000 ans cal BP, sous des fréquents et importants El Niño, lorsque les vents d'est se sont arrêtés, favorisant la navigation à voile vers l'est. Ces résultats soutiennent l'hypothèse de migrations vers l'est sous de faibles alizés. Les premiers colons étaient des navigateurs et des pêcheurs-cueilleurs, ils ont eu peu d'impact sur l'environnement. Autour de 1500-1300 ans cal BP, une nouvelle population s'est installée sur le site d'Emaotfer, a développé la culture de plantes médicinales, cérémoniales et alimentaires et a probablement pratiqué l'agriculture sur brûlis. Ce groupe a vécu sous un climat humide, également plus approprié au développement de l'horticulture. Nos résultats montrent la capacité d'adaptation des populations aux nouvelles contraintes environnementales et climatiques.

Les résultats issus des analyses polliniques et de micro-charbons livrent des informations assez complètes sur le paléoenvironnement, les relations Homme-climat-végétation et l'émergence de l'impact anthropique. Pour de futures recherches, il serait nécessaire d'obtenir plus de données sur la pluie pollinique d'un maximum de taxons, sur les exigences écologiques des espèces végétales et les paramètres climatiques actuels propre à chaque île, afin de modéliser de façon robuste les paysages, les climats et l'influence de l'Homme sur la dynamique de végétation passée (projet LandCover6k).

Mots-clés : Palynologie, Micro-charbons, Migrations océaniques, relations Homme-environnement, Climat, Holocène, Vanuat

## Abstract

The first settlers reached the Remote Oceania (east of the Solomon Islands) quite recently, around 3000 yr BP. There are several hypotheses concerning the causes of these migrations, and environmental changes have to be taken into account in the settlement proceeding. The arrival of populations on pristine islands has an influence on the native fauna and flora, but landscape responses to human impact vary for each site examined.

The aims of this research are to describe the human influence on the environment since the first migrations, to discriminate the climate impact, which causes these migrations and the landscape modification during the late Holocene; then, to characterize the human behaviour and adaptation on pristine island. To answer this problem, two palustrine cores, collected in Efate Island (central Vanuatu) were studied: the Emaotfer Swamp and the Otas Lake.

I have mainly used pollen and micro-charcoal analyses to reconstruct the arboreal and herbaceous vegetation found around the sites. I have also conducted of past temperatures and rainfalls reconstructions thanks to density probability functions.

At the climatic level, these analyses highlight a warm and wet period until 3700 cal yr BP. Then, a increase in magnitude and number of El Niño events caused a drier environment. Between 1950 and 750-600 cal yr BP, the results reveal a more humid climate, associated with the decrease in El Niño frequency and magnitude. The climatic variations recorded by the Otas Lake and the Emaotfer Swamp vegetation show a new dry period after 750-600 cal yr BP, corresponding to the Little Ice Age.

Lapita people reached Efate Island ca. 3000 cal yr BP under frequent and sustained El Niño events. During this period, easterly winds stopped and favoured eastward sail. These results support the hypothesis of eastward migrations under low trade winds. The first settlers were seafarers and fishers-gatherers, they had little impact on the environment. A new population settled the Emaotfer Swamp from 1500-1300 cal yr BP, developed medicinal, ceremonial and food plants cultivations and has probably practiced slash and burn agriculture. This group lived under humid climate, also more suitable to the development of horticulture. Our results show the adaptive capacity of populations to new environmental and climatic constraints.

The complementary of the pollen and micro-charcoal analyses deliver rather complete information on the palaeoenvironment, the Human-climate-vegetation relations and the emergence of the human impact. For future researches, it will be necessary to obtain more information on the pollen rain for a maximum of taxa, the ecological needs of plant species and the specific climate parameters for each island, to develop a robust model of past landscapes, climates and land-use (project LandCover6k).

Key words: Palynology, Micro-charcoal, Oceanian migrations, Human-environment relations, Climate, Holocene, Vanuatu



## Glossaire

*Les termes présentés dans ce glossaire sont signalés lors de leur première apparition dans le manuscrit par \**

**Effet réservoir marin** : cet effet, visible sur les carbonates de coquillages, est dû à un mélange des eaux qui remontent des fonds, chargées en vieux carbonates inorganiques, et des eaux de surface de la mer, en équilibre avec l'atmosphère. Sans correction, les organismes marins sembleront plus âgés que les organismes terrestres. Les facteurs de correction sont disponibles sur le site <http://intcal.qub.ac.uk/marine/>.

**Éruption phréatomagmatique** : éruption très violente, survenant lors de la rencontre d'un magma et d'eau superficielle (nappe phréatique, cours d'eau, lac, mer). Cette explosion correspond au réchauffement, à la vaporisation et à l'expansion brutale de l'eau au moment de la rencontre avec le magma (Foucault, A., Raoult, J-F., 2010. Dictionnaire de Géologie – 7<sup>ème</sup> édition, Dunod, 416 p.).

**Espace climatique** : écarts de températures et de précipitations minimum et maximum pour qu'une espèce végétale se développe de façon optimale.

**Horticulture** : Dans ce manuscrit, activité différenciable de l'agriculture par l'organisation de la culture des légumes, fruits et fleurs en jardins.

**Pluie pollinique** : ensemble des grains de pollen et des spores déposés dans un même lieu.

**Pollinie** : ensemble formé par des grains de pollen soudés entre eux et qui ne peuvent se disséminer loin de la plante qui l'a produit.

**Réaction hydro-isostasique** : réaction isostatique de la croûte terrestre liée au comportement d'une masse d'eau.

**Régime des feux** : pattern de feux de végétation caractéristique d'une région ou d'un écosystème ; cela comprend : le cycle du feu (nombres d'années requises pour brûler une superficie égale à celle du territoire qui nous intéresse), l'intervalle des feux (temps écoulé entre deux feux successifs, sur un site précis), l'occurrence de feu (nombre de feux présents sur un endroit et une période de temps donnés), la sévérité du feu (impact du feu sur la biodiversité) et la taille du feu (superficie couverte par un feu – Canadian Interagency Forest Fire Centre, 2003. The 2003 glossary of forest fire management terms. Canadian Interagency Forest Fire Centre, Winnipeg, MB).

**Réservoir** : bassin naturel ou artificiel où s'accumule l'eau issue des pluies et du ruissellement.

**Résilience** : la capacité d'un écosystème à maintenir sa structure et sa fonction malgré une perturbation (climat ou activité humaine par exemple). Le temps de résilience correspond à la période nécessaire pour qu'un écosystème retrouve un fonctionnement et un développement normal après avoir subi un bouleversement important (Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics 4, 1-23).

**Variation eustatique (ou eustatisme)** : toute montée ou baisse du niveau marin de même amplitude dans toutes les régions du globe.



1 Les environnements du Vanuatu de l'Holocène à nos jours  
2 : Un état des lieux des connaissances  
3 Vanuatu environments from the Holocene to the present  
4 day: A state of knowledge

5

6 RÉSUMÉ

7

8 La découverte des premiers sites archéologiques du Vanuatu remonte aux années  
9 60. Depuis, les connaissances scientifiques et archéologiques sur cet archipel ont  
10 grandement augmenté. Cependant, les relations entre l'Homme et les différents  
11 changements paléoenvironnementaux du Vanuatu restent un sujet débattu. Afin de  
12 mieux décrire ces relations, il est important de faire un point sur ce que nous savons  
13 des environnements passés et présents. Ce papier présente donc un état des lieux  
14 des connaissances en géologie, climat, biodiversité et archéologie du Vanuatu, de  
15 l'Holocène moyen jusqu'à nos jours. L'archipel du Vanuatu est relativement jeune et  
16 issu d'une forte activité volcanique et tectonique de la zone de subduction entre la  
17 plaque Pacifique et Australie. Le climat est majoritairement influencé par les  
18 relations atmosphère-océan Pacifique, déterminant les saisons humides et sèches.  
19 La faune et la flore sont principalement originaires d'Asie du sud-est mais  
20 l'isolement de l'archipel, la taille des îles et le gradient climatique entre le nord et le  
21 sud sont à l'origine de la présence de certaines espèces et sous espèces endémiques  
22 à l'archipel, voire à quelques îles. Les premières populations humaines n'ont atteint  
23 l'archipel qu'autour de 3200 ans BP. Entre 3200 et 2900 ans BP, la culture Lapita,

24 caractérisée par des poteries très décorées, est commune à tout le Vanuatu. Après  
25 2900 ans BP, les cultures divergent et diffèrent d'une île à une autre. A partir de 600  
26 ans BP, la culture polynésienne domine au Vanuatu dans les îles du centre et du sud.

27

28 Mots-clés

29 Vanuatu, Holocène, Tectonique, Volcanisme, Climat, Flore et Faune, Histoire de  
30 l'Homme.

31

## 32 ABSTRACT

33 The first Vanuatu archaeological site discovery dates back to the 60s, then the  
34 scientific and archaeological knowledge of this archipelago have increased.  
35 Nevertheless, the human activities-palaeoenvironmental changes relation in  
36 Vanuatu is still a matter of debate. In order to better determine this relation,  
37 reviewing the literature on past and actual environment is needed. This paper  
38 presents here a state of knowledge on Vanuatu geology, climate, biodiversity and  
39 archaeology, from the mid-Holocene to our present-day. The young archipelago  
40 results from strong volcanic and tectonic activity, due to the active subduction zone  
41 between Australian and Pacific plates. The atmosphere-ocean interactions  
42 determine the wet and dry seasons. Fauna and flora are principally derived from  
43 Southeast Asia. The occurrence of several species and subspecies endemic to the  
44 archipelago, if not to some islands, is probably due to the Vanuatu isolated location,  
45 the size of the islands and the climatic gradient between north and south. The first  
46 human populations reached the archipelago around 3200 yr BP. The Lapita culture,  
47 characterized by decorated potteries, is shared across the whole Vanuatu between

- 48 3200 and 2900 yr BP. After 2900 yr BP, cultures differ from one island to another.
- 49 After 600 yr BP, the Polynesian culture dominates in Vanuatu.
- 50
- 51 Keywords
- 52 Vanuatu, Holocene, Tectonic, Volcanism, Climate, Flora and Fauna, Human history.

53 1. Introduction

54

55 Il paraît déraisonnable aujourd'hui d'essayer de comprendre l'histoire de  
56 l'Homme préhistorique sans prendre en compte le contexte environnemental dans  
57 lequel il a vécu. Son comportement de subsistance, sa culture, ses modes de  
58 déplacements sont liés aux conditions naturelles et à leur variations Il convient de  
59 citer au préalable les paramètres qui déterminent l'environnement : il s'agit de  
60 l'ensemble des éléments naturels (biodiversité et phénomènes physiques)  
61 entourant un organisme vivant et pouvant interagir avec lui. Même si nous traitons  
62 souvent des relations entre l'Homme et son environnement, l'Homme peut aussi  
63 faire partie d'un environnement d'une autre espèce animale ou végétale.

64 Le Vanuatu est considéré comme non habité jusqu'à 3200 ans BP environ  
65 (Galipaud et Kelly, 2007), les interactions entre l'Homme et son environnement sur  
66 cet archipel sont donc relativement récentes. Dans les années 90-2000, Nunn  
67 (1997; 2003) proposa l'hypothèse que l'Homme n'avait pratiquement pas  
68 d'influence sur son environnement dans cette région du Pacifique sud et qu'il  
69 s'adaptait aux aléas du climat. Cette proposition a été contredite par la suite, mais  
70 les discussions concernant les liens entre les activités humaines et les évènements  
71 naturels qui se sont déroulés au cours de la préhistoire du Vanuatu sont toujours  
72 d'actualité.

73 Afin de mieux déterminer les interactions Homme-environnement qui se sont  
74 déroulées pendant l'Holocène récent, il est important de présenter point par point  
75 les différents paramètres environnementaux et les changements qui se sont  
76 produits dans le passé. C'est l'objectif de l'état des lieux présenté dans ce papier. La  
77 connaissance du présent nous permet de mieux appréhender le passé par le

78 principe d'actualisme (les processus s'étant exercés dans le passé se produisent  
79 encore à l'heure actuelle), mais l'état actuel des environnements étant le résultat de  
80 tous les évènements passés, la compréhension des phénomènes présents et futurs  
81 passe par l'étude des phénomènes antérieurs. Les modèles et les simulations tentent  
82 de prévoir les prochains changements environnementaux, et les données  
83 paléoécologiques servent de banc d'essai à ces modèles, afin de s'assurer qu'ils  
84 reproduisent fidèlement les évènements du passé avant de simuler ceux du futur.  
85 Ainsi, chaque chapitre aura une partie consacrée à l'environnement présent et à  
86 celui de l'Holocène.

87 Aujourd'hui les populations du Vanuatu subissent de plein fouet les  
88 conséquences du changement climatique (transfert de villages des côtes vers  
89 l'intérieur du pays par exemple). Or ces populations dépendent de leur  
90 environnement : les trois quarts des Vanuatais vivent grâce à l'agriculture et surtout  
91 l'horticulture : une grande diversité de plantes est utilisée depuis les premières  
92 installations humaines (Bourdy et Walter, 1987 ; Walter et al., 2003). La biodiversité  
93 a donc toujours fait partie du patrimoine vital de ces insulaires.

94 Tout d'abord, le contexte océanique sera exposé, puis nous présenterons la  
95 formation de l'archipel, ainsi que son activité tectonique et volcanique au cours du  
96 Quaternaire. La variabilité climatique actuelle sera ensuite abordée et nous  
97 développerons les changements climatiques qui ont eu lieu tout au long de  
98 l'Holocène. Nous présenterons ensuite un inventaire de la faune et la flore et  
99 l'origine de cette biodiversité. Les espèces animales et végétales n'ont pas changé  
100 depuis l'Holocène, seules des variations d'abondance de certaines espèces ont été  
101 observées selon les évènements climatiques, tectoniques, volcaniques et  
102 anthropiques. Nous exposerons également les données archéologiques et les



103 hypothèses concernant les déplacements et installations des populations humaines.  
104 La dernière partie de ce papier sera dédiée aux relations qui ont pu exister par le  
105 passé entre les environnements décrits précédemment.

## 106 2. Cadre géologique du Vanuatu

107

### 108 2.1. L'océan

109 Dans le cas d'un archipel, la terre et la mer sont indissociables. Celui du Vanuatu  
110 est localisé dans le sud ouest du Pacifique, entre 13°04' et 20°16 S et 166°32' et  
111 170°14' E, au niveau de la zone de subduction caractérisée par l'enfoncement de la  
112 plaque tectonique Australie sous la plaque Pacifique. La marge convergente du  
113 Vanuatu s'étendant sur 1400 km est profonde de 6000 à 8800 m (Siméoni, 2009 for  
114 a review). L'archipel est d'origine volcanique, et les premières îles ont émergé vers  
115 la fin de l'Oligocène (voir Annexe 2) à partir d'une large plateforme comprise entre  
116 100 et 3000 m de profondeur et située entre la marge convergente et un bassin  
117 arrière arc (bassin nord fijien – Figure 1).

118 Les fréquents mouvements tectoniques empêchent la formation de barrières de  
119 corail, mais il existe des récifs frangeants le long des côtes (faune actuelle, voir point  
120 4.3.). Dans le cadre d'études géologiques, la datation de terrasses coralliennes  
121 émergées peut être utilisée pour déterminer l'amplitude des mouvements verticaux  
122 passés (eg. Cabioch et al., 2003 – voir point 2.2.) et actuels (eg. Calmant et al., 1999).  
123 L'étude des isotopes stables (de l'oxygène et du carbone), ainsi que des rapports  
124 géochimiques Sr/Ca, Mg/Ca dans les coraux (eg. Kilbourne et al., 2004) et les  
125 mollusques (eg. Duprey et al., 2014), principalement les bénitiers (dont on ne  
126 prendra que les grands spécimens), permettent de reconstituer la température de  
127 surface, la salinité, les précipitations et donnent des informations précieuses sur le

128 climat du passé et ses changements. Si l'étude se focalise sur un ou quelques  
129 individus (cas des sites archéologiques), une courte fenêtre de temps (moins de 100  
130 ans) sera analysée à très haute résolution (annuelle à saisonnière) (eg. Cobb et al.,  
131 2003 ; Loubere et al., 2013). Une analyse sur une plus longue période de temps sera  
132 possible dans le cas d'étude des carottes de corail fossile (eg. Cabioch et al., 2008).

133

## 134 2.2. La tectonique

135 Le Vanuatu est composé de volcans sous-marins et terrestres dont certains  
136 toujours en activité (Ash et al., 1978). Les îles sont constituées de laves datant de la  
137 fin du Miocène (11-8 Ma) à l'Holocène ; s'ajoutent à cela des terrasses calcaires  
138 coralliennes issues des soulèvements tectoniques.

139 Durant le Quaternaire, les changements du niveau de la mer ont été dus à des  
140 soulèvements tectoniques et à des variations eustatiques. Les variations eustatiques,  
141 associées à la fonte des glaciers, ont entraîné une augmentation du niveau de la mer  
142 d'environ 120m depuis le Dernier Maximum Glaciaire, avec une importante  
143 accélération entre 11.3 ka et 6000 ans BP (Cabioch et al., 2003, Dickinson, 2003). Un  
144 réajustement hydro-isostatique a suivi l'arrêt de la fonte des glaces (Dickinson  
145 2001). Des soulèvements ont également affectés la morphologie côtière, dus à la  
146 proximité de la zone de subduction, s'ajoutent à ces fluctuations eustatiques. Le  
147 niveau de la mer a ainsi fluctué d'environ un mètre entre 3500 et 2500, en positif  
148 puis s'est établi à son niveau actuel (Bedford et al., 2007 ; Lecolle et al., 1990 ; Neff et  
149 Veeh, 1977 ; Pineda et Galipaud, 1998). Ces soulèvements varient d'une région à  
150 l'autre de l'archipel : les plus forts au niveau des îles du nord (jusqu'à 3.2mm/an à  
151 Malo) et les plus faibles vers le sud (maximum 1mm/an à Efate).

## 152 2.3. Le volcanisme

153 Le Vanuatu peut être divisé en trois chaînes parallèles, qui correspondent à trois  
154 épisodes volcaniques majeurs (Figure 2 et Annexe 2) : de l'Oligocène supérieur au  
155 Miocène moyen pour la chaîne occidentale, du Miocène supérieur à Pliocène  
156 inférieur pour la chaîne orientale et du Pliocène supérieur à actuel pour la chaîne  
157 centrale (Ash et al., 1978 ; Dugas et al., 1976 ; Luyendyk et al., 1974). Depuis  
158 l'Holocène, une douzaine de volcans sont actifs au Vanuatu (Figure 2). Nous  
159 développerons ici les activités éruptives des volcans les plus étudiés actuellement.  
160 Sauf précision, les données sont issues du site Smithsonian Institution Global  
161 Volcanism Program ([www.volcano.si.edu](http://www.volcano.si.edu)).

#### 162 Volcans phréatomagmatiques

- 163 - La caldera actuelle du volcan Ambrym s'est formée autour de 2000 ans BP,  
164 lorsqu'une forte éruption phréatomagmatique, sans doute due à l'infiltration  
165 de l'eau de mer, a été à l'origine de l'effondrement d'une partie du volcan et  
166 du haut de la chambre magmatique (McCall et al., 1970 ; Robin et al., 1993).  
167 L'activité s'est ensuite concentrée à l'intérieur de la caldera, autour de deux  
168 cônes éruptifs principaux. Les éruptions ont formé une série de cônes de  
169 scorie et maars le long d'un système de fissure orienté ENE-WSW. Ambrym  
170 est aujourd'hui un des volcans les plus actifs du Vanuatu, les éruptions se  
171 sont déroulées presque annuellement depuis le 18<sup>ème</sup> siècle.
- 172 - Le volcan Aoba est l'un des plus massifs du Vanuatu. Il est composé d'un  
173 volcan bouclier de style hawaïen au sommet duquel se trouve un cône  
174 pyroclastique contenant trois cratères. Des éruptions explosives sont  
175 régulièrement observées, mais la dernière éruption ayant causée des  
176 dommages à la population s'est déroulée il y a environ 300 ans.

177 - La caldera du Kuwae est située à l'emplacement actuel de plusieurs îles, qui  
178 constituaient, avant l'éruption de 1452 AD, un seul et unique volcan, le  
179 Kuwae. Cette éruption a vraisemblablement atteint des proportions  
180 catastrophiques et est considérée comme l'une des plus importantes de ces  
181 derniers 10 000 ans (Gao et al., 2006 ; Pang 1993). L'éruption s'est déroulée  
182 en plusieurs phases, éjectant 32-39 km<sup>3</sup> de roches et 235-414 Tg  
183 (Téragramme) d'aérosols (Monzier et al., 1994 ; Witter et Self, 2006).  
184 Pendant plusieurs mois, une éruption d'origine phréatomagmatique a  
185 expulsé des scories de type andésite basaltique. Une seconde phase  
186 d'éruption de magma dacitique, toujours d'origine phréatomagmatique,  
187 aurait entraîné l'effondrement du cratère du Kuwae. Des dépôts  
188 d'ignimbrites indiquent que cette phase a été accompagnée de coulées  
189 pyroclastiques. Depuis cette éruption, le Kuwae n'est pratiquement plus  
190 actif.

#### 191 Volcans stromboliens

192 - L'activité éruptive du Yasur enregistrée depuis 1.5 ka BP est tout d'abord  
193 irrégulière, puis d'intensité supérieure à l'actuel et de faible fréquence entre  
194 1.25 ka et 650 ans BP, et enfin de plus en plus fréquente (Firth et al., 2014).  
195 Selon Firth et al. le renforcement des phénomènes El Niño dans le Pacifique  
196 sud et les plus faibles précipitations seraient une conséquence des  
197 constantes éruptions du Yasur entre 650 et 200 ans BP (Petit Âge Glaciaire).

#### 198 Volcans basaltiques-andésitiques

199 - Le stratovolcan Gaua est en partie sous-marin et surmonté d'une caldera.  
200 Les premières éruptions, principalement des coulées de laves, dateraient du  
201 Pléistocène. La formation de la caldera a été accompagnée de l'émission

202 d'importantes quantités de cendres. Avant les années 60, peu d'éruptions  
203 volcaniques ont été enregistrées. Depuis, une douzaine d'éruptions se sont  
204 déroulées sur le Gaua.

205 - Le stratovolcan Lopevi est très actif depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Les  
206 éruptions sont explosives, constituées d'émissions de cendres et de coulées  
207 pyroclastiques et accompagnées de coulées de laves visqueuses.

208 - Le Suretamatai est un volcan composé d'une chaîne de petits stratovolcans  
209 construits sur un ancien volcan pléistocène. Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les  
210 éruptions sont à caractère explosif mais de moyenne intensité.

#### 211 Volcans basaltiques

212 - L'île d'Epi est constituée de deux volcans d'âge quaternaire, et dans sa partie  
213 est se trouve une entaille formée par une caldera sous-marine. C'est au  
214 niveau de cette caldera qu'a eu lieu l'ensemble des éruptions historiques  
215 d'Epi, notamment sur trois cônes dont les sommets sont localisés entre 35 et  
216 170 mètres de profondeur. Les éruptions, principalement effusives, sont de  
217 courte durée.

218 - Les volcans situés au nord d'Efate, à Mere Lava et à Motlav ont été actifs au  
219 cours de l'Holocène et du Pléistocène supérieur, mais aucune éruption n'a  
220 été enregistrée dans les temps historiques (Mallick et Ash, 1975).

221

#### 222 2.4. Les différents types de sols

223 Les sols, issus de l'érosion des roches volcaniques et des terrasses coralliennes,  
224 présentent une grande diversité de composition chimique et de structure selon l'âge  
225 de l'île, le type d'éruption volcanique, la géomorphologie et le climat (Aubert, 1972-  
226 1977 ; Quantin, 1975 ; Siméoni, 2009, for a review).

227 Les volcans actifs sur les îles les plus jeunes de l'archipel produisent des roches  
228 basaltiques, andésitiques et des cendres selon le type d'éruptions. Les andosols et  
229 les sols bruns eutrophes obtenus par l'érosion de ces roches sont peu évolués et  
230 fertiles. Ils varient selon la composition chimique de la roche dont ils sont dérivés.

231 Les îles sans volcans actifs depuis l'Holocène possèdent des sols bruns matures  
232 ferrallitiques ou fersiallitiques (évolution particulière des oxydes de fer) dont la  
233 composition chimique est influencée par le climat, différent selon l'altitude et  
234 l'exposition au vent. Sur des sols jeunes, les différenciations dues au climat sont  
235 presque imperceptibles. Cependant, des apports d'éjectas volcaniques entraînent  
236 systématiquement le rajeunissement des sols en surface, retardant leur évolution,  
237 estompant les effets des différents climats et augmentant leur fertilité. La  
238 composition chimique et la structure de ces sols se rapprochent des andosols.

239 Une forte érosion est présente sur les îles au relief important, comme Santo,  
240 Pentecost et Maewo. Même sous un climat très humide et sans éruption volcanique  
241 récente, les sols évoluent peu sur ces îles.

242

### 243 3. Variabilité climatique au Vanuatu

244

#### 245 3.1. État moyen et saisonnalité

246 L'Océan Pacifique est le plus étendu du globe, associé à des structures de  
247 circulations atmosphérique et océanique influençant la variabilité climatique  
248 mondiale. Les vents dominants sont les alizés : ces vents de sud-est et de nord-est  
249 convergent, formant la Zone de Convergence Inter-Tropicale ou ZCIT (Waliser et  
250 Gautier 1993 ; Xie et Saito 2001).

251 Les alizés poussent les eaux de surface de l’océan d’est en ouest, et l’accumulation  
252 d’eaux chaudes à l’ouest du Pacifique forme la Warm Pacific Warm Pool ou WPWP  
253 (Wyrтки, 1989 - Figure 3). Ces eaux chaudes plongent à l’ouest du Pacifique,  
254 entraînant un courant sous-marin, et un upwelling côtier au niveau de l’Amérique  
255 du sud. La WPWP génère des convections intenses de chaleur et d’humidité  
256 (Graham et Barnett 1995). Dans les hautes couches de l’atmosphère, cet air chaud et  
257 humide est repoussé vers l’est et descend le long de la côte ouest de l’Amérique du  
258 Sud. Cette boucle convective est appelée cellule de Walker (Newell, 1979). Le  
259 déplacement saisonnier des alizés et des structures qui leur sont associées suit la  
260 position apparente du soleil avec un décalage moyen de 6 à 8 semaines.

261 Une autre zone de convergence, la Zone de Convergence Sud Pacifique (ZCSP), se  
262 sépare de la ZCIT au niveau de la Papouasie et s’étend jusqu’à la Polynésie Française  
263 (Vincent, 1994 - Figure 3). Les processus mis en jeu dans la formation de cette zone,  
264 différents de ceux à l’origine de la ZCIT, sont encore difficilement expliqués  
265 (Beucher, 2010 for a review). Une des hypothèses les plus courantes est basée sur  
266 de forts gradients de températures de surface de la mer entre les tropiques et les  
267 moyennes latitudes qui entraîneraient d’importants flux de chaleur et donc une zone  
268 de convection (Kiladis et Weickmann, 1992).

269 Durant l’hiver austral (de mai à octobre), la ZCSP et la ZCIT se déplacent vers le  
270 nord et les alizés deviennent plus importants alors que pendant l’été austral, les  
271 zones de convergences se déplacent vers le sud et les alizés deviennent plus faibles  
272 et de direction plus variable.

273 Durant l’été austral, le climat est également influencé par la mousson d’été  
274 Indonésienne/Australienne (IASM), débutant dans l’hémisphère Sud en décembre,  
275 associée à des cyclones et à de fortes dépressions (McBride, 1987). Cette mousson

276 concerne les deux hémisphères, mais nous ne nous intéresserons qu'au cas de  
277 l'hémisphère sud. Plusieurs facteurs sont à l'origine du déclenchement de cette  
278 mousson (Hung et Yanai, 2004). Un contraste de température entre le sol et la mer,  
279 débutant vers la fin de l'hiver austral va créer une circulation d'air humide et chaud  
280 au dessus du nord de l'Australie et des îles adjacentes. L'arrivée de l'Oscillation de  
281 Madden-Julian (MJO), une perturbation atmosphérique originaire de l'océan Indien  
282 (Madden et Julian, 1971), est considérée comme l'évènement majeur dans le  
283 déclenchement de l'IASM. Le système de convection est soutenu par la MJO  
284 (Wheeler et al., 2009) et les alizés attirés par la dépression au dessus de l'Australie,  
285 qui continuent à apporter de l'air humide (Suppiah, 1992 ; Wheeler et McBride,  
286 2011).

287

### 288 3.2. Variabilité interannuelle du climat

289 Dans l'ensemble de l'océan Pacifique tropical, les variations interannuelles de  
290 température de surface et de précipitation sont principalement influencées par  
291 ENSO (Neelin et Latif, 1998). Il s'agit en réalité de deux évènements liés, le  
292 phénomène El Niño/La Niña et l'Oscillation australe. L'Oscillation australe  
293 correspond à la différence des anomalies de pression entre l'est et l'ouest du  
294 Pacifique sud, forte en période normale et faible en période El Niño (Walker et Bliss,  
295 1932).

296 Le phénomène El Niño se produit au début de l'été austral, lorsque le  
297 ralentissement des alizés sur l'équateur diminue l'intensité de l'upwelling côtier  
298 d'Amérique du sud, les eaux froides étant remplacées par des eaux plus chaudes. Ce  
299 réchauffement océanique est local (Wyrтки, 1975).



300 Certaines années, le réchauffement des eaux du Pacifique atteint une intensité  
301 exceptionnelle, et persiste jusqu'au début de l'hiver austral. Cette anomalie n'est  
302 plus locale mais liée à une anomalie du couplage océan-atmosphère régionale  
303 (Fedorov et Philander, 2001 ; McPhaden et Yu, 1999 ; Schopf et Suarez, 1988). La  
304 diminution du gradient de pression entre les régions est et ouest s'accompagne  
305 d'alizés plus modérés voire inexistants (Wyrтки, 1975). Durant cette période,  
306 l'accumulation d'eau chaude ne se fait plus dans le Pacifique ouest et la WPWP se  
307 déplace vers le centre équatorial, entraînant avec elle les précipitations qui lui sont  
308 associées ; cela se traduit par une diminution de la température de l'eau et une  
309 sécheresse du climat dans les îles du Pacifique sud-ouest (Wyrтки, 1975). On parle  
310 alors d'années "El Niño". Ces évènements se reproduisent à des intervalles  
311 irréguliers pouvant varier de 2 à 7 ans. Les événements La Niña sont associés à des  
312 impacts de structure similaire mais de déroulement et conséquence opposés.

313 Un autre phénomène, propre à l'océan Indien (Saji et *al*, 1999), peut influencer le  
314 climat du Pacifique sud ouest via les téléconnexions atmosphériques (Annamalai et  
315 *al*, 2005 ; Terray et Dominiak, 2005 ; Wu et Kirtman, 2005) : le Dipôle Océan Indien  
316 (IOD). L'IOD est positif quand la température de la surface de l'eau de l'océan Indien  
317 est supérieure à la normale à l'ouest et inférieure à la normale à l'est. Ces variations  
318 de températures de surface sont couplées avec des anomalies de vent et de  
319 précipitation. Dans le cas d'un IOD positif, une sécheresse en Asie du Sud-Est  
320 insulaire et dans le Nord de l'Australie est observée. Ce phénomène est cependant  
321 encore mal connu et son influence sur les océans Indien et Pacifique est toujours  
322 débattue (Dwivedi, 2012 ; Konecky et *al*., 2014 ; Kug et *al*., 2009).

323

324 3.3. Variabilité climatique depuis l'Holocène moyen

### 325 3.3.1. Les forçages sur le climat

326 Pendant pratiquement tout l'Holocène, le climat est influencé par trois forçages  
327 naturels principaux : solaire, orbital et volcanique. Durant les derniers 6000 ans, la  
328 combinaison des différents forçages n'a cessé de changer. Un certain nombre  
329 d'enregistrements paléoclimatiques et de modèles ont fourni des résultats pouvant  
330 indiquer un lien entre les changements climatiques et les changements d'activité  
331 solaire (Ammann et al., 2007 ; Wanner et Bütikofer, 2008 for a review).

332 Des enregistrements à long terme ont montré qu'il existait une cyclicité  
333 millénaire du climat à l'Holocène (Baker et al., 2001 ; Fleitmann et al., 2003 ; Gupta  
334 et al., 2003 ; Jones et al., 2006 ; Wang et al., 2005), mais les événements ne sont pas  
335 synchrones d'une région à l'autre.

### 336 3.3.2. Histoire du climat et de la variabilité climatique

337 Les analyses paléoclimatiques réalisées dans tout le Pacifique sud et les  
338 simulations montrent l'apparition d'une variabilité d'ENSO comparable à l'actuel  
339 débutant autour de 5000 ans BP (e.g. Anshari, 2000 ; Chazen et al., 2009 ; Clement et  
340 al., 2000 ; Conroy et al., 2008 ; Donders et al., 2008 ; Gagan et al., 2004 ; Ganopolski  
341 et al., 1998 ; Haberle et al., 2001 ; McGregor et Gagan, 2004 ; Moy et al.,  
342 2002 ; Sandweiss et al., 2001 ; Servant et Servant-Vildary, 2003 ; Vargas et al., 2006).  
343 Certains auteurs proposent cependant que de fréquents et intenses El Niño se  
344 seraient produits au cours de l'Holocène inférieur (Fan et al., 2013 ; Zhang et al.,  
345 2014). Entre 4000 et 1500 ans BP, la plus forte variabilité d'ENSO est enregistrée  
346 mais les pics d'amplitudes et/ou de fréquences varient selon les sites, les auteurs et  
347 les proxies utilisés (Brieker et al., 2007 ; Cobb et al., 2013 for a review ; Corrège et al.,  
348 2000 ; Denniston et al., 2013, 2014 ; Donders et al., 2007 ; Gagan et al., 2004 ;  
349 McGregor et Gagan, 2004 ; Moy et al., 2002 ; Tudhope et al., 2001 – Figure 4). En

350 compilant toutes ces données nous pouvons en déduire que la variabilité climatique  
351 au cours de l'Holocène, correspondant au maximum de variabilité d'ENSO, a été  
352 supérieure à l'actuel entre 2500 et 1700 ans BP.

353 L'apparition de cette variabilité d'ENSO autour de 5000 ans BP est plus soudaine  
354 dans les enregistrements paléoclimatiques que dans les modèles (Beucher et al.,  
355 2010, for a review). Ces modèles ne prenant en compte que le forçage orbital, cette  
356 différence montre que d'autres phénomènes peuvent influencer la fréquence et  
357 l'intensité d'ENSO. Les déplacements de la ZCIT et de la ZCSP seraient aussi pour  
358 partie à l'origine des variations d'ENSO (Fleitmann et al., 2003 ; Haug et al., 2001 ;  
359 Hu et al., 2008 ; Partin et al., 2007; Renseen et al., 2005 ; Wang et al., 2005). Ainsi, à  
360 l'Holocène moyen, le déplacement de la ZCIT vers le nord et des pluies qui lui sont  
361 associées va affaiblir les interactions entre l'Oscillation australe et ces pluies  
362 entraînant une faible variabilité d'ENSO. Autour de 4000 ans BP, la ZCIT se déplace  
363 vers le sud et favorise la variabilité d'ENSO. Les variations de l'intensité de  
364 l'insolation pourraient également influencer la fréquence et l'intensité des  
365 évènements ENSO (Braconnot et al., 2012 ; Loubere et al., 2013). Enfin, Thompson et  
366 al. (2000) suggèrent que de forts ENSO diminueraient l'intensité de la mousson. Le  
367 sujet est toujours discuté aujourd'hui (Denniston et al., 2013, 2014 ; McRobie et al.,  
368 2015 ; Nan et al., 2014 ; Steinke et al., 2014 ; Sun et al., 2005).

369 A partir de 1300 ans BP et jusqu'à environ 750 ans BP, les évènements La Niña  
370 deviennent plus importants que les El Niño, provoquant une humidification du  
371 climat en Océanie (Cobb et al., 2003 ; Khider et al., 2011 ; Mohtadia et al., 2007 ; Rein  
372 et al., 2004), phénomène connu sous le nom d'Optimum Médiéval - OM (Lamb,  
373 1965). L'amplitude et la fréquence marquées des évènements La Niña et IOD est à

374 l'origine d'une importante variabilité climatique à cette période (Goodwin et al.,  
375 2013 for a review ; Mohtadia et al., 2007).

376 Une période globalement plus froide suit l'Optimum Médiéval et persiste  
377 jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle environ : il s'agit du Petit Âge Glaciaire – PAG (Bradley et Jones,  
378 1993 ; Crowley et North, 1991). Cependant, les baisses importantes de températures  
379 ont été restreintes aux hautes latitudes (Rind, 2000 for a review). Sous les tropiques  
380 cet événement est marqué par un renforcement des vents associés à de plus forts El  
381 Niño (Goodwin et al., 2013 for a review ; Mann et al., 2009 ; Matthey et al., 2011).

382 Ces modifications du système océan-atmosphère, à l'origine de l'OM et du PAG,  
383 pourraient être liées à des variations de l'activité solaire (Mohtadi et al., 2007), mais  
384 aussi à de fortes éruptions volcaniques, comme celles des volcans Yasur et Kuwae  
385 (point 2.3.) (Adams et al., 2003 ; Cole-Dai et al., 2013 ; Firth et al., 2014). Tous les  
386 auteurs ne s'accordent pas sur les conséquences climatiques de ces événements sur  
387 les tropiques : certains suggèrent qu'ils ont eu des conséquences différentes de  
388 celles qui ont été citées plus haut, voire qu'ils n'ont pas significativement modifié le  
389 climat (Barr et al., 2014 - OM sec et PAG humide ; Oppo et al, 2009 - pas de  
390 changement de conditions pendant l'OM ; Yan et al., 2011 - OM sec et PAG humide ).  
391 En revanche, tous s'accordent à dire que le climat a changé de façon importante au  
392 moment de la transition OM/PAG : une diminution de la température de surface de  
393 la mer et la prédominance, soit d'El Niño soit de La Niña. Ces variations  
394 coïncideraient, nous le verrons, avec des modifications des comportements humains  
395 observées en Océanie (voir point 6.).

396 Au cours de l'été austral, la présence dans l'hémisphère sud de perturbations  
397 atmosphériques (ZCIT et ZCSP) associées à une température de subsurface de la mer  
398 (50 premiers mètres) au moins égale à 28°C vont être à l'origine d'un courant d'air

399 chaud ascendant entouré d'une couverture nuageuse dense : un cyclone. Il y a  
400 environ 40 à 50 cyclones par an (Beucher, 2010 for a review), mais leur variabilité  
401 actuelle comme passée reste encore difficile à cerner. Les différents enregistrements  
402 des cyclones tropicaux à l'Holocène récent montrent une alternance de périodes à  
403 activité cyclonique intense puis réduite. Dans le Pacifique sud-ouest, de forts  
404 cyclones sont enregistrés autour de 5000-4500, 4100-3400 et 2100-900 ans BP  
405 (Forsyth et al., 2010 ; Nott et al., 2009), mais la faible résolution de ces analyses  
406 (souvent millénaire) ne permet pas d'obtenir de dates plus précises pour ces  
407 évènements. Ainsi, Nott et al. (2007) ont identifié de grandes variations d'amplitude  
408 et de fréquence des cyclones pour les 800 dernières années. La comparaison  
409 modèles - données est une autre méthode d'investigation possible : Nott et Hayne  
410 (2001) ont pu remarquer que des cyclones extrêmement violents se produisaient  
411 tous les 200-300 ans environ depuis les 5000 dernières années.

412

#### 413 4. Diversité floristique et faunistique du Vanuatu

414

##### 415 4.1. Endémisme et spécificité de la biodiversité

416 De par son origine volcanique, le Vanuatu a d'abord été une île vierge de toute  
417 espèce animale comme végétale. Le vent, les oiseaux, les courants marins ou les  
418 radeaux naturels ont transporté la faune et la flore, principalement originaires de  
419 l'Asie du sud est, jusqu'à l'archipel (Munzinger et Lowry, 2011 ; Schmid, 1987).

420 Au Vanuatu, 4% des espèces de ptéridophytes et 20% des espèces  
421 d'angiospermes sont endémiques (Schmid 1987). Seuls quelques espèces de  
422 vertébrés et un tiers des espèces d'insectes sont endémiques à l'archipel (Siméoni,  
423 2009 for a review).

424 En se basant sur la distribution des oiseaux, chauves-souris, reptiles, végétaux et  
425 invertébrés, Hamilton et al. (2010) ont montré la présence d'une limite  
426 biogéographique distincte au Vanuatu, appelée la ligne de Cheesman (Fig. 5),  
427 divisant l'archipel en deux ensembles entre Efate et Erromango. Cheesman (1975)  
428 est la première à avoir suggéré l'existence de cette ligne, sans la définir de façon  
429 précise. De part et d'autre de cette ligne, certaines espèces sont plus abondantes au  
430 nord qu'au sud, et le cas inverse se présente pour d'autres espèces, marquant un  
431 filtre géographique entre ces deux régions (Gillison, 1975). Les biota (ensembles des  
432 organismes vivants présents dans une région donnée) distincts entre le nord et le  
433 sud de l'archipel peuvent s'expliquer par les différents types de climat et de sol (voir  
434 point 2.4.), influençant la végétation et donc la faune associée : le climat est  
435 légèrement plus humide et les sols sont plus variés au nord qu'au sud de la ligne.

436 En 2006, une importante mission de recensement de la biodiversité animale et  
437 végétale s'est déroulée sur l'île de Santo. Le Vanuatu est un "point chaud" de la  
438 biodiversité, et depuis les années 90 les populations locales, avec l'aide  
439 d'organisations non gouvernementales, tentent de protéger l'environnement face  
440 aux changements climatiques et à l'urbanisation du pays. Le développement de  
441 l'écotourisme, la protection de certains lieux en les rendant tabou ou en les faisant  
442 reconnaître officiellement (cinq Zones Protégées sont reconnues) font partie des  
443 actions menées au Vanuatu (Siméoni, 2009 for a review).

444

#### 445 4.2. Diversité de la flore

446 La végétation tropicale se développe en majorité en fonction des précipitations,  
447 favorisant le stockage de l'eau dans le sol, de la présence/absence d'eau douce ou  
448 saumâtre et de la température en haute altitude (Aubert, 1972-1977 ; Morishita et

449 Heki, 2008 ; Munzinger et Lowry, 2011 ; Siméoni, 2009 for a review ; Smith, 1979 ;  
450 Wheatley, 1992). On distingue huit grands types de végétation au Vanuatu (Figure  
451 5) :

452 La forêt humide de basse altitude, composée de grands arbres, lianes et fougères  
453 arborescentes est la végétation naturelle des côtes au vent (côte est), se développant  
454 jusqu'à 300-500m d'altitude selon les îles. Les vents apportent de la pluie en plus  
455 grande quantité sur la côte est (jusqu'à 400mm/mois) que sur la côte ouest  
456 (maximum 320mm/mois). Cette forêt est la plus diversifiée et structurellement la  
457 plus complexe des forêts du Vanuatu. Les genres *Syzygium*, *Metrosideros*  
458 (*Myrtaceae*), *Dysoxylum* (*Meliaceae*), *Meryta*, *Schefflera* (*Araliaceae*) et *Myristica*  
459 (*Myristicaceae*) sont les grands arbres dominants. Ces arbres sont couverts par la  
460 liane *Freycinetia* spp. (*Pandanaceae*). Sous la canopée, beaucoup d'espèces de  
461 *Rubiaceae* sont présentes, ainsi que *Dillenia* spp. (*Dilleniaceae*) et *Litsea* spp.  
462 (*Lauraceae*). La forêt à *Agathis* (*Araucariaceae*) et *Calophyllum* (*Clusiaceae*) est  
463 particulièrement présente dans les îles au sud d'Efate mais peut aussi être retrouvée  
464 dans le nord de l'archipel.

465 A l'ouest, au niveau des côtes sous le vent, la végétation est plus adaptée à des  
466 précipitations moindres : on remarque un effet marqué de la saison sèche sur la  
467 végétation. Cette forêt semi décidue est caractérisée par quelques grands arbres,  
468 dominés par *Acacia spirorbis*, *Gyrocarpus americanus*, *Intsia bijuga* et *Pterocarpus*  
469 *indicus* (*Fabaceae*), *Garuga floribunda* (*Burseraceae*) et *Kleinhovia hospita*  
470 (*Malvaceae*) ainsi que de nombreuses espèces de buissons et d'herbes comme  
471 *Clerodendrum buchanamii* (*Verbenaceae*), *Micromelum* spp. (*Rutaceae*), *Psychotria*  
472 spp. (*Rubiaceae*), *Croton* spp. et *Glochidion ramiflorum* (*Euphorbiaceae*), des *Poaceae*  
473 et des *Asteraceae*.

474 Au niveau des plaines inondées et des marécages, la forêt est composée d'épais  
475 taillis à *Hibiscus tiliaceus* (Malvaceae), de *Pandanus tectorius* (Pandanaeae), de  
476 Cyperaceae et de lianes comme *Caryatia trifolia* (Vitaceae).

477 Ces types de végétation sont dégradés par l'Homme ou naturellement (cyclones)  
478 et remplacés alors par une végétation secondaire composée de plantes pionnières  
479 héliophiles, le plus souvent des buissons, comme *Macaranga spp.*, *Mallotus spp.* et  
480 *Homalanthus spp.* (Euphorbiaceae), *Commersonia bartramia* (Malvaceae), *Cordia*  
481 *dichotoma* (Boraginaceae) et *Premna corymbosa* (Verbenaceae). Lorsque les  
482 conditions de stress diminuent, ces espèces vont ensuite laisser la place à une  
483 végétation plus exigeante, comme *Castanospermum australe* et *Serianthes spp.*  
484 (Fabaceae), *Dendrocnide latifolia* et *Pipterus argenteus* (Urticaeae), *Antiaris toxicaria*  
485 et *Ficus spp.* (Moraceae), *Endospermum medellosum* (Euphorbiaceae) et *Gardenia*  
486 *tannaensis* (Rubiaceae). Ce type de végétation est aujourd'hui très fréquent près des  
487 habitations.

488 Au dessus de 600m, le taux d'humidité augmente et la température baisse, une  
489 couverture nuageuse omniprésente donne son nom à cette végétation : la forêt de  
490 nuages. Les arbres sont plus petits et la canopée est principalement composée de  
491 *Metrosideros collina* et *Syzygium spp.* (Myrtaceae), *Weinmannia spp.* et *Geissois spp.*  
492 (Cunoniaceae), *Quintinia spp.* (Quintiniaceae) et *Ascarina spp.* (Chloranthaceae). De  
493 nombreux épiphytes, le plus souvent des orchidées dont *Dendrobium spp.* couvrent  
494 les arbres et la strate herbacée est dominée par des fougères, principalement  
495 *Cyathea spp.* (Cyatheaceae) et *Dicksonia spp.* (Dicksoniaceae).

496 La végétation des coulées de laves récentes est composée de mousses, de lichens,  
497 de fougères comme *Histiopteris incisa* (Dennstaedtiaceae) ou *Cyathea spp.* et de  
498 Poaceae comme *Imperata cylindrica* et *Miscanthus floridulus*. L'installation de cette



499 flore permet à des buissons comme *Melastoma denticulatum* (Melastomataceae),  
500 *Macropiper latifolium* (Piperaceae), *Wikstroemia rotundifolia* (Thymelaeaceae),  
501 *Pipturus argenteus*, *Pandanus spp.*, puis à des arbres comme *Ficus spp* de se  
502 développer.

503 Les mangroves, localisées dans les zones de balancement des marées, sont peu  
504 développées dans l'archipel. La végétation de mangrove est composée d'une dizaine  
505 d'espèces, dominée par *Rhizophora spp.*, *Bruguiera spp.*, *Ceriops tagal*  
506 (Rhizophoraceae), *Sonneratia alba* (Sonneratiaceae) et *Avicennia marina*  
507 (Verbenaceae), adaptée à une faible oxygénation du sol ainsi qu'à une eau saumâtre.  
508 Sur le front de plage se développe des lianes rampantes comme *Ipomea pes-caprae*  
509 (Convolvulaceae), *Vigna spp.* et *Canavalia spp.* (Fabaceae). En bordure de la plage  
510 poussent des petits arbres comme *Pandanus spp.* et *Tournefortia spp.* (Boraginaceae)  
511 ainsi que des arbres comme *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae), *Barringtonia*  
512 *asiatica* (Lecythidaceae), *Terminalia catappa* (Combretaceae), *Hernandia spp.*  
513 (Hernandiaceae) et *Vitex negundo* (Verbenaceae).

514 En protégeant certaines espèces locales comme *Cocos nuctifera* (Arecaceae),  
515 *Barringtonia edulis*, *B. novae-hiberniae*, *Burckella fijiensis* (Sapotaceae), *Canarium*  
516 *indicum* (Burseraceae), *Dracontomelon vitiense*, *Spondias cytherea* (Anacardiaceae),  
517 *Inocarpus fagifer* (Fabaceae), *Morinda citrifolia* (Rubiaceae), *Pometia pinnata*  
518 (Sapindaceae), *Syzygium malaccense* et *Terminalia catappa*, l'Homme, depuis 3  
519 millénaires, modifie la végétation naturelle. Des plantes ont ainsi pu être importées,  
520 à différentes périodes entre 3000 ans et l'époque actuelle, comme *Artocarpus altilis*  
521 (Moraceae), *Musa spp.* (Musaceae), *Colocasia esculenta* (Araceae), *Dioscorea*  
522 *bulbifera* (Dioscoreaceae), *Ipomea batatas*, *Citrus spp.* (Rutaceae), *Mangifera indica*  
523 (Anacardiaceae) et *Theobroma cacao* (Malvaceae). Cependant, certaines des espèces

524 introduites, comme *Merremia peltata* (Convolvaceae) ou *Mikania micrantha*  
525 (Asteraceae), envahissent les écosystèmes naturels et les cultures.

526 La végétation actuelle du Vanuatu est en grande partie recensée par les herbiers  
527 de Port Vila (<http://publish.plantnet-project.org/project/vanuaflora>), de Nouméa  
528 (IRD) (<http://herbier-noumea.plantnet-project.org>) et de Paris (MNHN)  
529 (<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/search#botany>).

530 La flore marine est aussi à prendre en compte. Les algues vertes les plus  
531 fréquentes sont les genres *Halimeda* (Halimedaceae) et *Caulerpa* (Caulerpacae) ;  
532 les algues rouges gélatineuses sont représentées par *Predaea* (Nemastomataceae) et  
533 *Gibsmithia* (Dumontiaceae). Les phanérogames marines *Thalassia*  
534 (Hydrocharitaceae), *Cymodocea* et *Syringodium* (Cymodoceaceae) et *Halophila*  
535 (Hydrocharitaceae) sont les seules plantes vasculaires marines présentes dans  
536 l'archipel.

537

#### 538 4.3. Diversité de la faune

539 L'isolement de l'archipel du Vanuatu et la taille des îles a défavorisé l'installation  
540 et le développement de mammifères de grande taille, à l'inverse d'autres espèces de  
541 petite taille (plus de 2000 espèces d'insectes par exemple). La faune marine du  
542 Vanuatu est connectée avec les autres îles du Pacifique ouest, à l'origine de son  
543 importante diversité. La faune aquatique d'eau douce a été peu étudiée et les  
544 premières données importantes vont être issues des résultats de l'expédition Santo  
545 2006.

546 La description de la faune, naturellement simplifiée, est basée sur les ouvrages  
547 suivants : Bouchet (2011) ; Bregulla (1991) ; Corbara (2011) ; Deharveng (2011) ;

548 Keith (2011); Poupin et Juncker (2010); Siméoni (2009 for a review) et Thollot  
549 (1996).

#### 550 Les coraux

551 Les espèces de coraux sont les mêmes que celles composant la grande barrière de  
552 corail en Australie. Les genres les plus fréquents sont les coraux branchus *Acropora*  
553 (*Acroporidae*) et *Millepora* (*Milleporidae*) qui se développent dans les baies  
554 abritées, les coraux pionniers *Pocillopora* (*Pocilloporidae*) et les coraux massifs  
555 *Porites* (*Poritidae*), *Goniastrea* (*Merulinidae*) et *Diploastrea* (*Diploastreidae*) adaptés  
556 aux eaux claires et turbulentes. Les conditions de vie des coraux dépendent aussi de  
557 la nature du substrat, de la profondeur, de la présence des brouteurs, des cyclones,  
558 de la compétition avec d'autres organismes benthiques et dans le cas du Vanuatu, de  
559 la tectonique, dont les soulèvements font émerger régulièrement des terrasses  
560 coralliennes.

#### 561 Les mollusques

562 En mer, les *Terebra* (*Terebridae*), les *Acmaeidae*, les *Seguenzioidea*, les  
563 *Pectinoidea* et les *Anomiidae* sont fréquents et diversifiés. Le bénitier géant  
564 *Tridacna maxima* (*Tridacnidae*) est commun à tous les récifs du Vanuatu. Certaines  
565 espèces se développent sur un substrat biogénique (bois, os ou algues), d'autres  
566 vivent en symbiose avec les coraux, afin de se cacher des prédateurs. Mais les  
567 relations mollusques-hôtes restent souvent floues.

568 Dans la mangrove, la plupart des mollusques sont des gastéropodes, dont le plus  
569 fréquent est *Terebralia palustris* (*Potamididae*). Les genres *Saccostrea* (*Ostreidae*)  
570 *Nerita*, *Neritodryas* et *Clithon* (*Neritidae*) sont également communs.

571 Sur terre, les familles les plus fréquentes sont les *Achatinellidae*,  
572 *Athoracophoridae* et les *Euconulidae*. Les espèces sont retrouvées en fonction du

573 type de sol et de l'altitude principalement. Les mollusques terrestres ont pu  
574 atteindre le Vanuatu, d'après certains auteurs, grâce aux cyclones et aux oiseaux  
575 migrants ; le faible pourcentage qui a pu arriver sur l'archipel a ensuite évolué,  
576 entraînant un fort taux d'endémisme spécifique (69%).

#### 577 Les Arachnides

578 Les informations concernant le nombre d'espèces d'araignées sont anciennes, et  
579 les récoltes réalisées pendant l'expédition Santo 2006 sont en cours d'étude. Le  
580 genre le plus connu tant par sa taille (abdomen de 5 cm) que par sa forte présence  
581 est *Nephila* (Nephilidae). Beaucoup d'espèces sont ubiquistes et vivent souvent  
582 proches des habitations.

#### 583 Les crustacés

584 En mer, les Caridea, les Xanthiadeae et le genre *Calappa* (Calappidae) sont les  
585 crustacés les plus fréquents. Ils se développent respectivement dans les récifs  
586 coralliens, sur les côtes rocheuses et sur les fonds sableux des lagons.

587 La mangrove sert de refuge à des crustacés comme *Macrophtalamus*  
588 (Macrophtalamidae), *Uca* (Ocipodidae) et *Neosarmatium* (Sersarmidae).

#### 589 Les insectes

590 Ce sont les animaux terrestres les plus diversifiés, mais seule une petite partie est  
591 recensée et le nombre d'espèces augmente régulièrement. Les abeilles et les guêpes  
592 sont solitaires, comme *Palaeorhyza maluae* (Colletidae) ou *Sphex spp.* (Sphecidae).  
593 Chez les papillons, les Pyraloidea et Noctuidae sont les plus communes. Les  
594 scarabées, très diversifiés, sont surtout représentés par les familles Cerambycidae,  
595 Curculionidae et Chrysomelidae. La plupart des crickets, comme les Eneopterinae,  
596 Podoscirtinae, Phaloriinae et Trigonidiinae sont présents dans toutes les zones  
597 boisées. Le moustique *Culex quinquefasciatus* (Culicidae), vecteur de *Plasmodium*

598 *relictum* (malaria), est omniprésent. Beaucoup d'insectes sont ubiquistes, mais  
599 certaines espèces ont des besoins très spécifiques, leurs habitats dépendant de la  
600 structure de la végétation, définissant des conditions micro climatiques.

#### 601 Les échinodermes

602 L'étoile de mer *Acanthaster planci* est la plus connue, sa faculté à manger du  
603 corail met en danger les récifs lorsqu'elle envahit les côtes. Les autres étoiles de mer  
604 *Gomophia*, *Celerina* (Ophidiasteridae), *Culcita* et *Choriaster* (Oreasteridae) sont  
605 fréquemment retrouvées sur les fonds des récifs coralliens. Dans ces mêmes récifs,  
606 les holothuries *Holothuria* (Holothuriidae) et *Thelenota* (Aspidochirotida) sont les  
607 plus communes.

#### 608 Les poissons

609 Les vertébrés marins sont représentés en majorité par des poissons de récifs,  
610 principalement les Labridae, les Pomacentridae et les Gobiidae. Beaucoup de ces  
611 poissons vivent en symbiose avec des coraux. Parmi les poissons des profondeurs,  
612 les Lutjanidae et les Serranidae sont les plus fréquents.

613 Les familles de poissons Gobiidae, Apogonidae, Carangidae, Serranidae,  
614 Lethrinidae, Clupeidae et Mugilidae sont les plus diversifiées et les plus  
615 représentatives des communautés de mangrove.

#### 616 Les mammifères

617 Sur terre, les seuls mammifères naturellement présents sont les chauves-souris,  
618 les deux genres *Pteropus* et *Notopterus* (Pteropodidae) étant abondants au Vanuatu.  
619 Les autres mammifères terrestres sont introduits : le cochon (*Sus scrofa*), le chien et  
620 le rat (*Rattus exulans*, *Rattus praetor*) seraient arrivés avec les navigateurs Lapita,  
621 bien que les restes de ces espèces soient peu nombreux dans les sites  
622 archéologiques (Kirch, 1997, Noury et Galipaud, 2011 for a review, Sheppard et

623 Green, 1991). Nous verrons plus tard (point 5.2.3.) l'utilisation par les Hommes de la  
624 propriété de la croissance continue des dents chez le cochon. Les études génétiques  
625 des ossements de rat, systématiquement associés à une installation humaine,  
626 permettent d'obtenir des informations sur l'origine et le trajet des migrations  
627 humaines (Matisoo-Smith, 2015 for a review). Les bovins et les chevaux ont été  
628 introduits par les européens.

629 Une seule espèce de mammifère marin, *Dugong dugon* (Dugongidae) est à noter.

### 630 Les tortues et les lézards

631 Les espèces de tortues marines *Eretmochelys imbricata* et *Chelonia mydas*  
632 (Cheloniidae) sont les plus fréquentes. Il n'y a pas de serpent indigène terrestre, et le  
633 serpent marin *Laticauda colubrina* (Elapidae) se rencontre régulièrement sur les  
634 plages ou dans les lagons.

635 *Emoia cyanura* (Scincidae) est le lézard le plus commun de la mangrove.

636 Les reptiles terrestres sont mal connus : les geckos, comme le *Nactus arnouxii*  
637 (Gekkonidae) et les scinques (lézards) sont les plus représentés.

### 638 Les oiseaux

639 Sur une centaine d'espèces d'oiseaux, sept sont endémiques. Les espèces marines  
640 sont les plus fréquemment rencontrées, comme *Puffinus pacificus* (Procellariidae),  
641 présent dans tout le Pacifique, ou *Esacus magnirostris* (Burhinidae), un oiseau  
642 migrateur. La plupart des oiseaux sont ubiquistes, à l'exception de quelques espèces  
643 dont l'habitat dépend de l'altitude.

644 Certaines espèces d'oiseaux, comme *Sterna bergii* (Laridés), *Egretta sacra* et  
645 *Butorides striatus* (Ardeidae) et *Rallus philippensis* (Rallidae) ne se trouvent que  
646 dans la forêt de mangrove, les autres espèces observées sont communes au littoral.

647 Le coq (*Gallus gallus*) aurait été introduit par les premières populations qui ont  
648 atteint le Vanuatu (Kirch, 1997, Noury et Galipaud, 2011 for a review, Sheppard et  
649 Green, 1991), le moineau et le merle des Moluques (*Acridotheres tristis*) ont été  
650 apportés par les européens.

651

## 652 5. Histoire de l'Homme

653

### 654 5.1. Le Complexe Culturel Lapita

#### 655 5.1.1. Les origines

656 Les premiers peuplements en Océanie Lointaine se sont produits tardivement  
657 dans l'histoire de l'humanité, entre 3300 et 2700 ans BP, par des populations  
658 possédant une culture bien particulière : la culture Lapita (eg. Bellwood, 1979 ;  
659 Kirch, 1984). Ces peuplements ont été à l'origine de la mosaïque de sociétés existant  
660 actuellement dans cette région du globe. Plus de 200 sites Lapita se répartissent  
661 entre les îles de la Papouasie-Nouvelle-Guinée à l'ouest et l'archipel des Samoa à  
662 l'est, en passant par les îles Salomon, Vanuatu, Nouvelle-Calédonie, Fiji et Tonga  
663 (Bedford et Spriggs, 2007 ; Bedford, 2006 ; Burley et Connaughton, 2007 ; David et  
664 al., 2011 ; Kumar et al., 2004 ; McNiven et al., 2011 ; Noury et Galipaud, 2011 for a  
665 review, Petchey, 2001 ; Sand et al., 1998 ; Torrence, 2002). Le site archéologique  
666 découvert au lieu-dit Lapita, sur la presqu'île de Koné en Nouvelle-Calédonie, est  
667 internationalement connu grâce aux fouilles de 1952 réalisées par E.W. Gifford et R.  
668 Shutler (Gifford et Shutler, 1956). Ces recherches ont permis de décrire pour la  
669 première fois des tessons de poterie à décors pointillés (voir point 5.1.3.), qui a pris  
670 plus tard le nom de « poterie Lapita » et le "complexe culturel Lapita" qui lui est

671 associé (Green, 1979). Malheureusement, encore beaucoup de sites fouillés n'ont  
672 pas fait l'objet de publications (Bedford et Sand, 2007 for a review).

673 L'origine de la culture Lapita est encore incertaine : elle aurait émergé, selon  
674 certains auteurs, grâce à des innovations au sein de populations de la Mélanésie  
675 insulaire (Allen et White, 1989 ; Gosden, 1989 ; Terrel 2004 ; White et Allen, 1980).  
676 D'autres voient l'intrusion d'une nouvelle population venant d'Asie du sud-est  
677 comme le phénomène à l'origine de cette culture (Bellwood et al., 1995 for a review ;  
678 Kirch et Hunt, 1988 for a review). L'hypothèse privilégiée actuellement par les  
679 chercheurs est en fait une combinaison des deux précédentes, nommée le modèle du  
680 triple i, pour intrusion, innovation et intégration (Green, 2000, 2003 - Figure 6). Les  
681 Lapita seraient des austronésiens, il y a environ 5000 ans, ces derniers auraient  
682 colonisé le nord de la Mélanésie en partant du sud-est de la Chine et de Taiwan. Les  
683 interactions régulières avec d'autres groupes vivant sur les îles Bismarck et  
684 Salomon, descendants de populations pléistocènes, auraient permis l'évolution de la  
685 culture de ces austronésiens en culture Lapita. Les navigateurs porteurs de la  
686 culture Lapita se seraient dispersés rapidement dans tout le Pacifique sud-ouest,  
687 jusqu'aux îles Fiji et à la Polynésie occidentale. Les résultats issus de la génétique,  
688 l'anthropologie physique, la linguistique et l'archéologie confirment cette hypothèse  
689 (Bellwood, 2005, 2011 ; Donohue et Denham, 2012 for a review ; Pawley, 2002,  
690 2007 ; Sand, 2010, for a review).

#### 691 5.1.2. Les migrations

692 Des chercheurs proposent que les populations Lapita voyageaient sur des  
693 pirogues à balanciers relativement simples (Anderson, 2000, 2003 ; Irwin, 2008),  
694 qui ne pouvaient naviguer que sous le vent, mais cette proposition n'est pas admise  
695 à l'unanimité (Di Piazza, 2014). La dispersion contre les vents d'est dominants



696 pouvait donc être difficile et se faire à une faible vitesse. Bien que l'hypothèse soit  
697 controversée, l'augmentation démographique en Asie du sud-est insulaire aurait pu  
698 être un évènement à l'origine des migrations humaines depuis Taiwan jusqu'en  
699 Océanie (Bellwood, 2011). Les paramètres climatiques et les vents dominants ont  
700 été pris en compte dans le cadre des études sur le peuplement de l'Océanie. Il  
701 semble que les déplacements ont dû être plus faciles en période de mousson, au  
702 moment où les vents d'est faiblissent (Fitzpatrick et Callaghan, 2013 ; Irwin, 1992  
703 for a review). L'augmentation du nombre de El Niño durant la période 3500-2500  
704 ans BP a aussi dû avoir un impact sur l'expansion austronésienne, mais la nature  
705 aléatoire de ces évènements empêche de connaître l'exact trajet qui serait viable  
706 sous de telles conditions. (Anderson et al., 2006). L'éruption massive du volcan W-  
707 K2 en Nouvelle Bretagne autour de 3350 ans BP aurait aussi pu pousser les  
708 populations à partir (Specht, 2007 for a review ; Specht et Torrence, 2007).  
709 L'absence de trace de la culture Lapita au delà des îles Tonga et Samoa pourrait  
710 correspondre à l'arrêt de l'expansion Lapita, expliquée par la nécessité d'avoir des  
711 embarcations avec une technologie plus complexe pour traverser le Pacifique  
712 oriental (Ambrose, 1997 for a review).

713 Au Vanuatu (Figure 7), les premiers colons Lapita ont pu arriver à Makué, au sud  
714 de Santo entre 3238 et 3158 ans BP (Galipaud et Kelly, 2007). Le cimetière de  
715 Teouma, sur l'île d'Efate, correspond à l'assemblage funéraire le plus important  
716 découvert parmi les sites Lapita anciens. Ce site regroupe à ce jour 68 tombes,  
717 contenant environ 100 individus, daté entre 2940-2880 ans cal BP, voire 3110-2930  
718 ans cal BP (Bedford et al., 2010 ; Petchey et al., 2014). Les positions dans lesquelles  
719 ont été retrouvés les squelettes (déplacement des ossements d'une tombe à l'autre,  
720 présence de crâne dans des poteries décorées), ainsi que la présence d'une

721 crémation (Scott et al., 2010) indiquent des rituels funéraires assez complexes.  
722 Depuis la découverte de ce site, de nombreuses études ont été réalisées afin de  
723 mieux connaître ces premières populations et leur relation avec leur environnement  
724 (Bentley et al., 2007 ; Buckley et al., 2014 ; Kinaston et al., 2014b ; Valentin et al.,  
725 2010, 2014). Un régime alimentaire et des positions funéraires différents ont ainsi  
726 pu être observés pour quelques individus. Ils pourraient correspondre aux premiers  
727 migrants Lapita arrivés sur l'île d'Efate.

### 728 5.1.3 La culture Lapita

729 Les céramiques, symboles de la culture Lapita, sont ornées de motifs suivants des  
730 règles artistiques bien précises. Ces motifs, majoritairement pointillés ou incisés,  
731 réalisés sur une pâte rouge brique, incluent des faces anthropomorphes et des  
732 dessins géométriques (Kirch, 1997 for a review). En moyenne, les deux tiers des  
733 céramiques sont composés d'argiles et de sables dégraissants, provenant de moins  
734 de 200 km du site où a été retrouvée la céramique (Dickinson, 2006). Les plus  
735 anciennes poteries Lapita présentent des motifs déjà élaborés, suggérant des  
736 compétences importantes et des techniques qui sont familières aux populations  
737 (Bedford et Sand, 2007 for a review). En revanche, la forme des poteries et leur  
738 décor ne semblent pas permettre d'établir une chronologie ou de connaître l'usage  
739 des celles-ci (Bedford et al., 2007 ; Chiu 2005 ; Clark et Murray, 2006). Ces fragiles  
740 poteries décorées devaient avoir une fonction particulière, comme offrande ou  
741 utilisée lors de rituels, au contraire des poteries plus simples et plus fonctionnelles,  
742 les poteries « plainware » employées probablement quotidiennement, que l'on  
743 retrouve tout au long de la préhistoire océanienne (Bedford et al., 2007 ; Chiu, 2005  
744 ; Chiu, 2007 ; Kirch, 1997 for a review ; Noury et Galipaud, 2011 for a review ;  
745 Spriggs, 1997).

746 Mais la culture Lapita se caractérise aussi par une stratégie de subsistance et par  
747 une culture matérielle non céramique (Kirch, 1997 for a review). Sur les sites  
748 archéologiques sont retrouvés des herminettes en *Tridacna* ou en pierre (souvent  
749 de couleur verte), des parures en *Conus* (Conidae), des éclats d'obsidienne et des  
750 outils pour la pêche (hameçons) en os et en bois.

751 Le régime alimentaire des populations Lapita a été mixte, principalement basé  
752 sur des ressources issues de la pêche et de la cueillette. Des restes de poissons,  
753 tortues de mer et crocodiles sont régulièrement retrouvés lors des fouilles (Bedford,  
754 2006). Une faible activité horticole et le contrôle de quelques animaux comme le  
755 cochon étaient aussi pratiqués (Allen, 2007 ; Horrocks et Bedford, 2005 ; Valentin et  
756 al., 2010). Cette stratégie de subsistance peut s'expliquer par le temps qu'il faut aux  
757 plantes introduites par les colons pour fournir suffisamment de nourriture pour  
758 toute une communauté, les rendant plus indépendants des ressources marines  
759 (Walter et al., 2003). Le Kava, boisson rituelle originaire du Vanuatu, aurait été  
760 cultivé peu de temps après l'arrivée des premiers Lapita (Lebot et al., 1997 for a  
761 review).

#### 762 5.1.4. Les échanges

763 Les réseaux d'échanges de biens (poteries, obsidiennes, ornements en  
764 coquillages, animaux domestiques), tels qu'ils sont reconstitués par les archéologues  
765 et les linguistes, sont extrêmement vastes à l'échelle géographique (Bedford et Sand,  
766 2007 for a review). Le déclin d'ouest en est de la diversité des objets et des espèces  
767 (animales comme végétales) circulant entre les différentes îles indiquerait que les  
768 réseaux d'échanges s'affaiblissaient au fur et à mesure que les populations se  
769 déplaçaient vers l'est (Galipaud et al., 2014 ; Sheppard et Walter, 2006).

770

771 5.2. Les traditions post-Lapita

772 5.2.1 Les origines

773 Le complexe culturel Lapita, identifiable dans cette région du Pacifique par des  
774 céramiques particulières et associée à une expansion humaine très rapide, diverge  
775 ensuite pour donner un ensemble de cultures post-Lapita qui se terminera autour  
776 de 1000 ans BP et dont les caractéristiques varient selon le temps et la géographie  
777 (Bedford, 2009 ; Spriggs 2004). Une diminution des contacts entre les îles du nord et  
778 du sud du Vanuatu aurait favorisé une évolution différente de la culture selon les  
779 îles, expliquant cette variabilité (Lynch 2004 ; Reepmayer and Clark, 2010 ; Spriggs,  
780 2004). Les modifications environnementales auraient aussi influencé le  
781 développement des sociétés post-Lapita (Bedford, 2006).

782 Ces cultures sont beaucoup moins connues que la culture Lapita, et les poteries  
783 retrouvées sur les sites sont très fragmentées, rendant difficile la description de  
784 motifs. Les filiations entre les populations Lapita et post-Lapita restent encore  
785 discutées (Bellwood et al., 2011 ; Spriggs, 2004).

786 5.2.2. Les cultures Post-Lapita

787 Les céramiques Lapita sont remplacées entre 2900 et 2700 ans BP par des  
788 poteries avec des décors incisés et appliqués qui vont être présentes pendant près  
789 de 2000 ans. Les sociétés et les traditions céramiques associées forment une  
790 mosaïque de cultures qui peuvent être regroupées selon la géographie (Figure 7) : le  
791 nord (Santo, Malekula), le centre (Efate, Tongoa) et le sud (Tanna, Erromango). Le  
792 réseau d'échange et les migrations qui se sont succédés entre ces zones  
793 géographiques et entre le Vanuatu et les autres îles pendant la période post-Lapita  
794 expliqueraient la présence de quelques poteries aux formes et motifs similaires  
795 d'une île à une autre. Cependant, nous ne développeront pas en détail les cultures

796 post-Lapita : la plupart des caractéristiques de ces céramiques varient en fonction  
797 du temps et de l'espace ; à chaque île correspond une culture bien précise (Bedford,  
798 2006, 2009 ; Garling, 2007 ; Ward, 1979).

799 L'archéologie montre que les sites d'occupations Lapita semblent avoir été  
800 abandonnés rapidement et /ou peu utilisés. Il est possible que ce type de site, en  
801 bord de mer et au vent (facilement accessible en pirogue à voile) soit moins adapté à  
802 une population plus sédentaire que les Lapita (Bedford, 2006). Les populations  
803 post-Lapita se seraient donc déplacées vers l'intérieur des îles, vers des zones moins  
804 sèches que le bord de mer (Hope et al., 1999). Le tubercule (taro et igname), riche en  
805 amidon, est devenu la base de l'alimentation de ces populations et des animaux  
806 domestiqués (comme le cochon - Kinaston et al., 2014a ; Martin et Steadman, 1999).  
807 Ces stratégies de subsistances semblent avoir peu changé depuis.

#### 808 5.2.3. L'influence polynésienne

809 Entre le 12<sup>ème</sup> et le 16<sup>ème</sup> siècle (de 600 à 250 BP), le Vanuatu est soumis à  
810 l'influence culturelle et sociale de la Polynésie. Peu de céramiques ont été retrouvées  
811 dans les niveaux datés de 600 ans BP et au delà, mais le nombre et la variété  
812 d'artéfacts en coquillages augmente considérablement (Shutler et al., 2002). Les  
813 parures et surtout les dents de cochons recourbées en spirales apparaissent  
814 (Garanger, 1972 ; Spriggs, 1997 for a review). Ces dents de cochons, présentes dans  
815 les îles du centre et du sud du Vanuatu à partir du 15<sup>ème</sup> siècle, sont aujourd'hui un  
816 des symboles de l'archipel et sont supposées être d'origine polynésienne. Elles  
817 attestent de la place importante du cochon dans la société vanuataise (Garanger,  
818 1972). En ôtant les canines supérieures chez le cochon, celles du bas ne peuvent plus  
819 s'user, continuent de pousser et finissent par s'enrouler ; l'animal doit être alors  
820 nourri à la main. Une des influences notables des polynésiens a été la

821 restructuration des sociétés des îles du centre du Vanuatu avec à sa tête un chef  
822 puissant, prenant le titre de Roy Mata. Les fouilles menées par J. Garanger en 1967  
823 sur une sépulture datée autour de 1600 AD sur l'île de Retoka à Efate ont permis de  
824 mettre au jour une quarantaine de squelettes, accompagnés de conques, bijoux en os  
825 et coquillages, défenses de porc (Coiffier 2009 ; Garanger, 1972). Il s'agit de Roy  
826 Mata et vraisemblablement de ses femmes et d'hommes désignés ou volontaires  
827 pour l'accompagner dans la tombe. Garanger s'est aussi rendu sur l'île de Lelepa  
828 associée historiquement à la demeure de Roy Mata et une couche d'occupation datée  
829 de 1450 à 1600 AD a été trouvée.

830

## 831 6. Interrelations entre les paramètres environnementaux à l'Holocène

832

833 Nous allons nous concentrer sur les relations entre les paramètres  
834 environnementaux naturels et anthropiques pendant la période holocène.

835 Les surrections tectoniques, seules ou combinées avec des variations eustatiques  
836 ou hydro-isostatique modifient le paysage en modifiant la ligne de rivage, comme la  
837 baisse du niveau de la mer qui a pu être observée dans cette région du Pacifique  
838 autour de 3000 ans BP (Fall, 2005 ; Wirrmann et al., 2011a, Wirrmann et al., 2011b).  
839 Ces mouvements tectoniques impactent aussi la faune marine en provoquant  
840 l'émersion ou l'enfoncement des récifs coralliens (voir point 2.1.). Des déplacements  
841 de populations vers l'intérieur des terres et les changements d'alimentation  
842 observés entre la période Lapita et post-Lapita peuvent être reliés en partie à cette  
843 baisse du niveau de la mer, entraînant une disparition des mangroves, des récifs  
844 côtiers, et des ressources qu'ils généraient (Carson, 2013).

845 Les aérosols volcaniques (téphras) contiennent des sels métalliques d'aluminium  
846 et de fluorure (Giggenbach, 1996). La présence de ces aérosols dans l'eau douce  
847 permettrait la formation de molécules d'aluminofluorure complexes, toxiques pour  
848 la faune et la flore en contact avec l'eau. A l'inverse, le pH plus élevé de l'eau de mer  
849 empêche la formation de ces molécules toxiques, protégeant les écosystèmes marins  
850 des effets des retombées volcaniques (Frogner Kockum et al., 2006). Les aérosols  
851 émis lors d'une éruption peuvent avoir un impact à court terme (10-20 ans  
852 maximum pour une importante éruption) sur le climat. En diminuant les radiations  
853 solaires, les aérosols refroidissent la surface de la Terre de quelques W/m<sup>2</sup>,  
854 (Crowley, 2000), ce qui correspond à un refroidissement d'environ 0.1-0.2°C. A titre  
855 d'exemple, lors de l'éruption du Kuwae de 1452 AD, les températures  
856 atmosphériques sur les îles Epi et Tongariki ont pu atteindre 40 à 50°C pendant une  
857 brève période suivant l'éruption (Hoffman, 2007). Par la suite, l'importante quantité  
858 de particules émises dans l'atmosphère a dû être suffisante pour bloquer les rayons  
859 du soleil pendant plusieurs années, affectant la flore, la faune et les populations. Les  
860 cendres ont aussi dû favoriser les pluies acides, aggravant la destruction de la  
861 végétation (Hoffman, 2007 ; Pang, 1993).

862 Le développement de la flore et la faune est dépendant des conditions  
863 climatiques, différents selon la côte (ouest ou est), l'altitude et la latitude (voir point  
864 4.). D'importantes variations du climat au cours du Quaternaire vont modifier la  
865 dynamique floristique et faunistique (Hope et al., 2004 for a review). Les feux,  
866 d'origine naturelle ou anthropique, peuvent fortement influencer la végétation et  
867 son temps de résilience, la rendant plus vulnérable à des changements climatiques  
868 (Biagioni et al., 2015). Cependant dans le Pacifique, les feux, même en période sèche,  
869 font office d'exception avant l'arrivée de l'Homme (Spriggs, 2010 for a review).

870 L'origine et le trajet des migrations humaines ont pu être influencés par des  
871 variations climatiques. Des évènements climatiques, comme les fluctuations El  
872 Niño/La Niña ou la transition OM/PAG, en inondant ou en asséchant de façon  
873 importante une partie des zones cultivables, ont entraîné des migrations, des  
874 échanges, mais aussi potentiellement des compétitions et des conflits entre les  
875 différentes populations insulaires (Field et Lape, 2010 ; Masse et al., 2006). Des  
876 changements climatiques pourraient aussi être à l'origine d'un régime alimentaire  
877 des populations post-Lapita différent des Lapita (Valentin et al., 2014).

878 L'arrivée d'habitants sur des îles vierges a également influencé l'environnement  
879 de l'archipel. Ces populations devront s'adapter à leur nouveau milieu, le modifier  
880 pour le rendre habitable ou se déplacer à nouveau. La relativement faible diversité  
881 floristique et faunistique des îles à l'est de la Nouvelle-Guinée empêche un  
882 peuplement permanent de cette région sans une base économique horticole (Kirch,  
883 1997 for a review). L'introduction d'animaux comme le cochon et le poulet, ou de  
884 plantes comme le taro, la banane, l'igname, (Anderson, 2009 ; Horrocks et Bedford,  
885 2005 ; Horrocks et al., 2009 ; Prebble et Wilmshurst, 2008 ; Storey et al., 2008 ;  
886 Walter et al., 2003) ont pu avoir un impact sur la population autochtone animale et  
887 végétale. Les données de paléovégétation au Vanuatu sont rares, mais celles des îles  
888 voisines nous renseignent sur les relations Hommes-environnement. Des  
889 changements de végétation et une augmentation des feux a été interprétée comme  
890 l'impact de l'Homme sur son environnement, soit dès l'arrivée des premiers colons  
891 (Stevenson, 2004) ou plusieurs générations après (Fall, 2005 ; Hope et al., 1999 ;  
892 Wirmann et al., 2011b). Un rapide appauvrissement, voire une disparition de  
893 plusieurs espèces animales – surtout des oiseaux – sont contemporains dans cette  
894 région du Pacifique, de l'arrivée des Lapita (Allen, 2007 ; Anderson, 2002). Si la



895 disparition de plusieurs espèces animales coïncide avec la date des premières  
896 installations humaines, les changements de paysages se sont surtout produits  
897 pendant la période post-Lapita. Avec le développement de l'agriculture, les  
898 déforestations et les feux d'origine anthropique se sont multipliés (Anderson, 2002).  
899 Les populations s'installant de façon plus permanente que les Lapita ont pu  
900 (volontairement ou non, la question n'est pas résolue) accélérer les processus  
901 d'érosion ou modifier les formations du sol par l'installation de leur site, de leur  
902 jardins ou zones d'élevages. (Spriggs, 2010 for a review).

903 Les travaux sur l'impact de l'arrivée de l'Homme sur ces îles sont toujours en  
904 cours de réalisation.

905

## 906 7. Conclusion

907

908 Les premières îles de l'archipel volcanique du Vanuatu sont datées de la fin de  
909 l'Oligocène et des volcans toujours actifs continuent de construire les îles les plus  
910 jeunes. Des éruptions peuvent avoir des effets à court terme (1-2 ans) sur le climat  
911 océanique, d'autant plus que la myriade d'îles présentes dans cette région du  
912 Pacifique complexifie les connexions atmosphère-océan. Les changements  
913 climatiques holocènes, majoritairement influencés par les phénomènes de  
914 moussons et d'ENSO restent encore difficiles à interpréter. L'isolement de l'archipel  
915 a favorisé un certain endémisme de la faune – surtout terrestre – et de la flore  
916 originaire d'Asie du sud-est. Les premiers colons sont arrivés tardivement dans  
917 l'histoire du Vanuatu, mais l'impact anthropique est surtout marqué après l'arrivée  
918 des européens.

919 Les relations entre les différents paramètres environnementaux sont complexes,  
920 et les quelques exemples exposés dans le chapitre 6 ne constituent qu'une petite  
921 partie de tous les cas possibles que l'on pourrait développer. Distinguer les  
922 véritables liens de causes à effets et les simples covariances n'est pas si évident,  
923 d'autant plus que des datations issues des sites archéologiques ne sont pas toujours  
924 assez précises pour pouvoir les comparer aux dates d'autres évènements,  
925 climatiques ou géologiques. De plus, plusieurs changements environnementaux  
926 peuvent se produire à la même période. Il reste ainsi compliqué de déterminer si les  
927 populations présentes au Vanuatu avant les premiers européens ont seulement  
928 profité des changements environnementaux, pour, par exemple, cultiver une plante  
929 plutôt qu'une autre, ou si elles ont elles-mêmes été à l'origine de plusieurs  
930 modifications écologiques. Tenter de répondre à ces questions est le but du travail  
931 de palynologue que je mène depuis bientôt trois ans sur les relations Homme-  
932 climat-végétation au Vanuatu à l'Holocène et dont voici une synthèse.

933 Deux carottes prélevées dans un marais et dans un lac sur l'île d'Efate ont été  
934 analysées. La carotte issue du marais est la plus longue et remonte jusqu'à 6000 ans  
935 BP environ, alors que celle issue du lac couvre le dernier millénaire et est  
936 entrecoupée de passées sableuses stériles en pollen. Des analyses  
937 sédimentologiques, géochimiques et de micro-faune ont également été réalisées.

938 Un changement important de la végétation est noté autour de 3700 ans BP : la  
939 forêt tropicale humide diminue brusquement jusqu'à quasiment disparaître ; elle est  
940 remplacée par des taxons pionniers héliophiles. Ce changement se produisant avant  
941 l'arrivée de l'Homme peut être relié aux premiers pics importants de fréquence et  
942 d'amplitude d'ENSO. Entre 3100 et 2600 BP les plantes pionnières diminuent,  
943 favorisant le développement de la forêt semi décidue, une végétation plus mature,

944 indiquant une baisse de la variabilité climatique. Après 2600 BP, un nouveau pic de  
945 taxons pionniers est observé. Il serait possible de relier ce changement à un impact  
946 anthropique local, mais le faible pourcentage des charbons de bois, leur taille et de  
947 leur surface ainsi que le faible pourcentage de plantes herbacées ne semble pas  
948 correspondre à cette hypothèse. Les fortes valeurs des taxons pionniers  
949 révéleraient-elles des fréquences et amplitudes d'ENSO supérieures à l'actuel  
950 comme l'enregistrent les proxies paléoclimatiques entre 2500 et 1700 BP ? Un  
951 retour à des conditions plus humides après 1700 ans BP est marqué par une  
952 augmentation de la forêt semi décidue puis de la forêt humide. Dès 1400 BP une  
953 forte augmentation des feux, de plantes herbacées locales puis des plantes  
954 importées indiquent l'influence de l'Homme sur son environnement. Des couches de  
955 téphras sont observées régulièrement dans la carotte issue du marais mais il semble  
956 difficile de les relier à un changement de végétation. Les résultats polliniques  
957 obtenus à partir de la carotte prélevée dans le lac indiquent une modification de  
958 conditions environnementales. Ce changement peut être comparé à celui qui se  
959 produit dans le marais, où l'Homme adapte les plantes qu'il cultive en fonction des  
960 exigences climatiques. Cependant, des problèmes de datations sont encore à régler  
961 avant d'aller plus loin dans l'interprétation.

962

### 963 Remerciements

964 Nous tenons à remercier les personnes présentes sur place au Vanuatu, notamment  
965 l'équipe de l'herbier de Port Vila et Chanel Sam, ainsi que Mme Donna Kalfatak, du  
966 Department of Environmental Protection and Conservation, pour leurs précieux  
967 conseils et informations pendant les missions de terrain.

968 Merci à Anne-Marie Sémah d'avoir relu et aidé à corriger ce papier avant envoi.

969 Ce travail a été soutenu par l'unité de recherche Biogéochimie-Traceurs-  
970 Paléoclimats (BTP LOCEAN, UMR 7159, CNRS-IRD-UPMC-MNHN, France) et par le  
971 Département de Préhistoire (UMR 7194, MNHN, France). Cette étude a été  
972 supportée financièrement par la région Ile-de-France (réf. 12016503).  
973

973

## 974 RÉFÉRENCE DES FIGURES

975 Figure 1 : La convergence actuelle entre les plaques Pacifique et Australie est  
976 caractérisée par une zone de déformation composée par deux zones de  
977 subductions de sens opposé : la zone Nouvelle-Zélande – Kermadec – Tonga et la  
978 zone Papouasie-Nouvelle-Guinée – Salomon – Vanuatu. Des bassins océaniques  
979 sont situés entre ces deux subductions. La figure ci-contre présente une coupe  
980 géologique du bassin Nord Fijien. D’après Ash et al. (1978) et Siméoni (2009 for  
981 a review).

982

983 Figure 1: A deformation area, constituted by two opposite subduction zones,  
984 New Zealand – Kermadec – Tonga and Papua-New-Guinea – Salomon – Vanuatu  
985 zones, characterize the actual convergence between Pacific and Australian  
986 plates. Back-arc basins are located between these two zones. The above figure  
987 presents a geological section of the north Fijian basin. Modified after Ash et al.  
988 (1978) and Siméoni (2009 for a review).

989

990 2 : Carte géologique présentant les volcans aériens actifs majeurs et l’âge des  
991 trois chaînes volcaniques de l’archipel du Vanuatu (voir l’annexe 2 pour la  
992 correspondance âge période géologique). D’après Ash et al. (1978), Dugas et al.  
993 (1976), Luyendyk et al. (1974) et Siméoni (2009 for a review).

994

995 Figure 2: The major aerials active volcanoes, the three geological ridges of the  
996 Vanuatu Archipelago and their ages of formation (see the appendix 2 for the age-

997 geological period relation). Modified after Ash et al. (1978), Dugas et al. (1976),  
998 Luyendyk et al. (1974) and Siméoni (2009 for a review).

999

1000 Figure 3 : A) Localisation de la WPWP (isotherme 28°C) en été et en hiver  
1001 austral. L'archipel du Vanuatu est entouré en blanc. La redistribution de  
1002 l'énergie solaire entre l'été et l'hiver modifie le placement des alizés et donc les  
1003 contractions/expansions de la WPWP. B) La convergence d'air chaud et humide  
1004 des alizés de l'hémisphère nord et sud à l'origine de l'ITCZ entraîne de fortes  
1005 précipitations dans cette zone du Pacifique. L'archipel du Vanuatu est entouré en  
1006 orange. Les deux figures sont réalisées d'après Beucher (2010 for a review).

1007

1008 Figure 3: A) WPWP location (28°C isotherm) in austral summer and winter. A  
1009 white circle highlights the Vanuatu archipelago. The solar energy redistribution  
1010 between summer and winter modify the easterly trade wind position and the  
1011 compression/expansion of the WPWP. B) The ITCZ and the strong rainfall in the  
1012 south-west Pacific are due to the convergence of the hot and humid air brought  
1013 by the trade winds from the north and south hemisphere. An orange circle  
1014 highlights the Vanuatu archipelago. Modified after Beucher (2010 for a review).

1015

1016 Figure 4 : Variation de l'amplitude et/ou de la fréquence d'ENSO au cours de  
1017 l'Holocène moyen et supérieur, obtenue selon différents auteurs et proxies. Les  
1018 deux rectangles orange signalent les périodes d'ENSO importantes observées  
1019 dans tous les graphes. Auteurs et proxies donnés pour les graphes allant de la  
1020 gauche vers la droite :

1021 Moy et al., 2002 : Étude sédimentologique, analyse des couleurs du sédiment,  
1022 Équateur.

1023 Conroy et al., 2008 : Granulométrie associée à de la modélisation, Galápagos.

1024 Brijker et al., 2008 :  $\delta^{18}\text{O}$  et rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques,  
1025 Papouasie-Nouvelle- Guinée.

1026 Gagan et al., 2004 : Rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques, rapport  
1027 Sr/Ca et  $\delta^{18}\text{O}$  de coraux fossiles et charbons. Comparaison de ces proxies avec  
1028 des modèles. Papouasie-Nouvelle-Guinée, Indonésie, Australie, Philippines,  
1029 Vanuatu. Les rectangles gris correspondent aux périodes d'ENSO supérieures à  
1030 l'actuel.

1031 Haberle et al., 2001 : Comparaison entre charbons et données de la variabilité  
1032 d'ENSO, Papouasie-Nouvelle-Guinée.

1033

1034 Figure 4: Mid and late Holocene ENSO frequency and magnitude, according on  
1035 the authors and the proxies. The two orange rectangles correspond to important  
1036 ENSO periods observed in all the curves. Authors and proxies are given for each  
1037 curve from the left to the right:

1038 Moy et al., 2002: Sedimentological and colour sediment analyses, Ecuador.

1039 Conroy et al., 2008: Grain size analysis and models, Galapagos.

1040 Brijker et al., 2008:  $\delta^{18}\text{O}$ , Mg/Ca from planctonic foraminifera, Papua-New-  
1041 Guinea.

1042 Gagan et al., 2004: Mg/Ca from planctonic foraminifera, Sr/Ca,  $\delta^{18}\text{O}$  from coral  
1043 and charcoal analysis. Theses proxies are compared with models. Papua-New-

1044 Guinea, Indonesia, Australia, Philippines, Vanuatu. The grey rectangles  
1045 correspond to ENSO variability higher than actual.

1046 Haberle et al., 2001: Comparison between charcoal and ENSO variability data,  
1047 Papua-New-Guinea.

1048

1049 Figure 5 : Carte de distribution de la végétation sur l'archipel du Vanuatu. Afin de  
1050 ne pas surcharger la carte, les formations végétales locales comme la forêt  
1051 littorale ou la forêt alluviale ne sont pas reportées. D'après Aubert (1972-1977),  
1052 Siméoni, (2009 for a review) et Wheatley (1992).

1053

1054 Figure 5: Map showing the vegetation distribution in the Vanuatu archipelago. In  
1055 order to make it easy to read, local vegetation formations as coastal forest or  
1056 riparian forest are not reported on the map. Modified after Aubert (1972-1977),  
1057 Siméoni, (2009 for a review) and Wheatley (1992).

1058

1059 Figure 6 : Origine possible de la culture Lapita et déplacement de populations. Il  
1060 est probable que les navigateurs Lapita quittant les îles Bismarck vers 3300 ans  
1061 BP soient les descendants des populations parties de Taïwan autour de 5000 ans  
1062 BP. La culture de ces derniers aurait évolué dans les îles Bismarck vers la culture  
1063 Lapita. D'après Bellwood (2005, 2011), Donohue et Denham (2012 for a review)  
1064 Pawley (2002, 2007) et Sand (2010 for a review).

1065

1066 Figure 6: Possible origin of the Lapita culture and population shifts. There may  
1067 be a filiations link between population who left Taiwan ca. 5000 yr BP and



1068 Lapita seafarers who left the Bismarck Islands ca. 3300 yr BP. The population's  
1069 culture from Taiwan could have been evolved into Lapita culture in the Bismarck  
1070 Islands. Modified after Bellwood (2005, 2011), Donohue et Denham (2012 for a  
1071 review) Pawley (2002, 2007) and Sand (2010 for a review).

1072

1073 Figure 7 : Sites archéologiques fouillés au Vanuatu, déterminés selon leur âge  
1074 (culture) et le type de site. Les sites non datés ne sont pas représentés sur la  
1075 carte. D'après Bedford (2006) et Siméoni (2009 for a review).

1076

1077 Figure 7: Type of site and age (culture) of the excavated archaeological sites in  
1078 Vanuatu. The undated sites are not presented on the map. Modified after  
1079 Bedford (2006) and Siméoni (2009 for a review).

1080

1081

1081

1082 **BIBLIOGRAPHIE**

1083

1084 - Adams, B., Mann, M., Ammann, C., 2003. Proxy evidence for an El Niño-like  
1085 response to volcanic forcing. *Nature* 426, 274-278.

1086 - Allen, J., White, J.P., 1989. The Lapita Homeland: Some new data and an  
1087 interpretation. *Journal of the Polynesian Society* 98, 129-146.

1088 - Allen, M., 2007. Three millennia of human and sea turtle interactions in Remote  
1089 Oceania. *Coral Reefs* 26, 527-538.

1090 - Ambrose, W.R., 1997. Contradiction in Lapita pottery, a composite clone. *Antiquity*  
1091 71, 525-538.

1092 - Ammann, C., Joos, F., Schimel, D., Otto-Bliesner, B., Tomas, R. 2007. Solar influence  
1093 on climate during the past millennium: results from transient simulations with the  
1094 NCAR Climate System Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*  
1095 104, 3713-3718.

1096 - Anderson, A., 2000. Slow boats from China: Issues in the prehistory of Indo-Pacific  
1097 seafaring. In: O'Connor, S., Veth, P., (Ed.), *East of Wallace's Line: Studies of past and*  
1098 *present maritime cultures of the Indo-Pacific region. Modern Quaternary Research*  
1099 *in Southesat Asia, Rotterdam, Pays-Bas, pp. 13-50.*

1100 - Anderson, A., 2002. Faunal Collapse, Landscape Change and Settlement History in  
1101 Remote Oceania. *World Archaeology* 33, 375-390.

1102 - Anderson, A., 2003. Initial human dispersal in Remote Oceania: pattern and  
1103 explanation. *Pacific archaeology assessments and prospects: Proceedings of the*  
1104 *International Conference for the 50th anniversary of the first Lapita excavation,*  
1105 *Koné-Nouméa 2002, Nouvelle-Calédonie.*

1106 - Anderson, A., 2009. The rat and the octopus: initial human colonization and the  
1107 prehistoric introduction of domestic animals to Remote Oceania. *Biological Invasion*  
1108 11, 1503-1519.

1109 - Anderson, A., Chappell, J., Gagan, M., Grove, R., 2006. Prehistoric maritime  
1110 migration in the Pacific islands: an hypothesis of ENSO forcing. *The Holocene* 16, 1-  
1111 6.

1112 - Annamalai, H., Xie, S., Mc Creary, J.P., Murtugudde, R., 2005. Impact of indian ocean  
1113 sea surface temperature on developping el niño. *Journal of Climate* 18, 302-319.

1114 - Anshari, G., 2000. Late Quaternary vegetation and environments in the Lake  
1115 Sentarum Wildlife Reserve, West Kalimantan, Indonesia Thèse de doctorat, School of  
1116 Geography and Environmental Science, Monash University, Australia.

1117 - Ash, R.P., Carney, J.N., McFarlane, A., 1978. *Geology of Efate and Offshore Islands,*  
1118 *Mineral Survey Project (JDP 103) New Hebrides Government Geological Survey, Port*  
1119 *Vila, Vanuatu.*

1120 - Aubert, G., 1972-1977. *Atlas des sols et de quelques données du milieu naturel –*  
1121 *Archipel des Nouvelles Hébrides. ORSTOM, Paris, France.*

1122 - Baker, P., Rigsby, C., Seltzer, G., Fritz, S., Lowenstein, T., Bacher, N., Veliz, C., 2001.  
1123 *Tropical climate changes at millennial and orbital timescales in the Bolivian*  
1124 *Altiplano. Nature* 409, 698-701.

1125 - Barr, C., Tibby, J., Gell, P., Tyler, J., Zawadzki, A., Jacobsen, G.E., 2014. Climate  
1126 variability in south-eastern Australia over the last 1500 years inferred from the  
1127 high-resolution diatom records of two crater lakes. *Quaternary Sciences Reviews* 95,  
1128 115-131.

1129 - Bedford, 2006. *Pieces of the Vanuatu Puzzle: Archaeology of the North, South and*  
1130 *centre. Terra Australis* 23, ANU Press, Canberra, Australie.

- 1131 - Bedford, S, 2009. Les traditions potières Erueti et Mangaasi du Vanuatu central :  
1132 réévaluation et comparaison quarante ans après leur identification initiale. Journal  
1133 de la Société des Océanistes 128, 25-38.
- 1134 - Bedford, S., Sand, C., 2007. Lapita and Western Pacific Settlement: Progress,  
1135 prospects and persistent problems. Terra Australis 26, 1-7.
- 1136 - Bedford, S., Spriggs, M., 2007. Northern Vanuatu as a Pacific Crossroads: the  
1137 Archaeology of Discovery, Interaction and the Emergence of the Ethnographic  
1138 present. Asian Perspectives 47, 95-120.
- 1139 - Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., Valentin, F., Regenvanu, R., Abong, M., 2010. A  
1140 cemetery of first settlement: Teouma, South Efate, Vanuatu/Un cimetière de premier  
1141 peuplement : le site de Teouma, sud d'Efate, Vanuatu. In: Sand, C., Bedford, S. (Ed.),  
1142 Lapita: Oceanic Ancestors/Lapita: Ancêtres Océaniens. Musée du Quai  
1143 Branly/Somogy, Paris, France, pp. 140-161.
- 1144 - Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., Macgregor, C., Kuautonga, T., Sietz, M., 2007.  
1145 The excavation, conservation and reconstruction of Lapita burial pots from the  
1146 Teouma site, Efate, Central Vanuatu. Terra Australis 26, 223-240.
- 1147 - Bellwood, P., 1979. Man's Conquest of the Pacific. Oxford University Press, Oxford,  
1148 UK.
- 1149 - Bellwood, P., 2005. First Farmers. The origin of Agricultural Societies. Blackwell  
1150 publishings, Hoboken, USA.
- 1151 - Bellwood, P., 2011. Holocene Population History in the Pacific Region as a Model  
1152 for Worldwide Food Producer Dispersals. Current Anthropology 52, 363-378.
- 1153 - Bellwood, P., Fox, J., Tryon, D., 1995. The Austronesians in History: Common origins  
1154 and diverse transformations. In : Bellwood, P., Fox, J., Tryon, D. (Ed.), The

1155 Austronesians: Historical and comparative perspectives. ANU Press, Canberra,  
1156 Australie, pp. 1-16.

1157 - Bentley, R.A., Buckley, H.R., Spriggs, M., Bedford, S., Ottley, C.J., Nowell, G.M.,  
1158 Macpherson, C.G., Pearson, D.G., 2007. Lapita Migrants in the Pacific's Oldest  
1159 Cemetery: Isotopic Analysis at Teouma, Vanuatu. *American Antiquity* 72, 645-656.

1160 - Beucher, F., 2010. *Météorologie Tropicale : des alizés au cyclone*. Météo France,  
1161 Paris, France.

1162 - Biagioni, S., Wündsche, M., Haberzettl, T., Behling, H., 2015. Assessing  
1163 resilience/sensitivity of tropical mountain rainforests towards climate variability of  
1164 the last 1500 years: The long-term perspective at Lake Kalimpaa (Sulawesi,  
1165 Indonesia). *Review of Palaeobotany and Palynology* 213, 42-53.

1166 - Bouchet, P., 2011. Marine ecosystems. In: Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O.  
1167 (Ed.), *The natural history of Santo*. Publications scientifiques du muséum, Paris,  
1168 France, pp. 337-464.

1169 - Bourdy, G., Walter, A., 1987. *Fibres et liens : quelques plantes de Vanuatu utilisées*  
1170 *en technologie traditionnelle*. Naïka, Port Vila, Vanuatu.

1171 - Braconnot, P., Luan, Y., Brewer, S., Zheng, W., 2011. Impact of Earth's orbit and  
1172 freshwater fluxes on Holocene climate mean seasonal cycle and ENSO  
1173 characteristics. *Climate Dynamics* 38, 1081-1092.

1174 - Bradley, R., Jones, P., 1993. Little Ice Age summer temperature variations: their  
1175 nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene* 3, 367-376.

1176 - Bregulla, H.L., 1991. *The Birds of Vanuatu*. Anthony Nelson LTD, Middlesbrough,  
1177 UK.

1178 - Brijker, J.M., Jung, S.J.A., Ganssen, G.M., Bickert, T., Kroon, D., 2007. ENSO related  
1179 decadal scale climate variability from the Indo-Pacific Warm Pool. *Earth and*  
1180 *Planetary Science Letters* 253, 67-82.

1181 - Buckley, H.R., Kinaston, R., Halcrow, S.E., Foster, A., Spriggs, M., Bedford, S., 2014.  
1182 Scurvy in a tropical paradise? Evaluating the possibility of infant and adult vitamin C  
1183 deficiency in the Lapita skeletal sample of Teouma, Vanuatu, Pacific islands.  
1184 *International Journal of Paleopathology* 5, 72-85.

1185 - Burley, D., Connaughton, S., 2007. First Lapita settlement and its chronology in  
1186 Vava'u, Kingdom of Tonga. *Radiocarbon* 49, 131-137.

1187 - Carson, M.T., 2013. Austronesian Migrations and Developments in Micronesia,  
1188 *Journal of Austronesian Studies* 4, 25-52.

1189 - Cabioch, G., Banks-Culter, K.A., Beck, W.J., Burr, G.S., Corrège, T., Lawrence  
1190 Edwards, R., Taylor, F.W., 2003. Continuous reef growth during the last 23 cal kyr BP  
1191 in a tectonically active zone (Vanuatu, Southwest Pacific). *Quaternary Science*  
1192 *Reviews* 22, 1771-1786.

1193 - Cabioch, G., Wirmann, D., Sémah, A-M., Corrège, T., Le Cornec, F., 2008. Évolution  
1194 des paléoenvironnements dans le Pacifique lors de la dernière déglaciation :  
1195 exemples en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. *Journal de la Société des Océanistes*  
1196 126-127, 25-40.

1197 - Calmant, S., Cabioch, G., Régnier, M., Pillet, R., Pelletier, B., 1999. Surrections  
1198 cosismiques et subsidence intersismique enregistrées par des coraux à Mallicolo  
1199 (Vanuatu, Pacifique sud-ouest). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Serie*  
1200 *IIA - Earth Planetary Science* 328, 711-716.

1201 - Chazen, C.R., Altabet, M.A., Herbert, T.D., 2009. Abrupt mid-Holocene onset of  
1202 centennial-scale climate variability on the Peru-Chile Margin. *Geophysical Research*  
1203 *Letters* 36, L18704.

1204 - Cheesman, L.E., 1957. Biogeographical Significance of Aneityum Island, New  
1205 Hebrides. *Nature* 180, 903-904.

1206 - Chiu, S., 2005. Meanings of a Lapita Face: Materialized Social Memory in Ancient  
1207 House Societies. *Taiwan Journal of Anthropology* 3, 1-47.

1208 - Chiu, S., 2007 Detailed Analysis of Lapita Face Motifs: Case Studies from Reef/Santa  
1209 Cruz Lapita Sites and New Caledonia Lapita Site 13A. *Terra Australis* 26, 241-264.

1210 - Clark, G & Murray, T 2006. Decay characteristics of the eastern Lapita design  
1211 system. *Archaeology in Oceania* 41, 107-117.

1212 - Clement, A.C., Seager, R., Cane, M.A., 2000. Suppression of El Niño during the Mid-  
1213 Holocene by changes in the Earth's orbit. *Paleoceanography* 15, 731-737.

1214 - Cobb, K.M., Charles, C.D., Cheng, H., Edwards, R.L., 2003. El Niño/Southern  
1215 Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* 424, 271-  
1216 276.

1217 - Cobb, K.M., Westphal, N., Sayani, H.R., Watson, J.T., Di Lorenzo, E., Cheng, H.,  
1218 Edwards, R.L., Charles, C.D., 2013. Highly Variable El Niño–Southern Oscillation  
1219 Throughout the Holocene. *Science* 339, 67-69.

1220 - Coiffier, C., 2009. « Promesse tenue ». José Garanger et le retour au Vanuatu des  
1221 objets de la sépulture de Roy Mata. *Journal de la Société des Océanistes* 128, 15-23.

1222 - Cole-Dai, J., Ferris, D.G., Lanciki, A.L., Savarino, J., Thiemens, M.H., McConnell, J.R.,  
1223 2013. Two likely stratospheric volcanic eruptions in the 1450s C.E. found in a  
1224 bipolar, subannually dated 800 year ice core record. *Journal of Geophysical*  
1225 *Research Atmospheres* 118, 7459-7466.

1226 - Conroy, J.L., Overpeck, J.T., Cole, J.E., Shanahan, T.M., Steinitz-Kannan, M., 2008.  
1227 Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake  
1228 sediment record. *Quaternary Science Reviews* 27, 1166-1180.

1229 - Corbara, B., 2011. Terrestrial fauna. In: Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Ed.),  
1230 The natural history of Santo. Publications scientifiques du muséum, Paris, France,  
1231 pp. 119-236.

1232 - Corrège, T., Delcroix, T., Récy, J., Beck, W., Cabioch, G., Le Cornec, F., 2004. Evidence  
1233 for stronger El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive  
1234 coral. *Paleoceanography* 15, 465-470.

1235 - Crowley, T.J., 2000. Causes of climate changes over the past 1000 years. *Science*  
1236 289, 270-277.

1237 - Crowley, T.J., North, G., 1991. *Paleoclimatology*. Oxford University Press, Oxford,  
1238 UK.

1239 - David, B., McNiven, I., Richards, T., Connaughton, S.P., Leavesley, M., Barker, B.,  
1240 Rowe, C., 2011. Lapita sites in the Central Province of mainland Papua New Guinea.  
1241 *World Archaeology* 43, 576-593.

1242 - Deharveng, L., 2011. Caves and soils. In: Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Ed.),  
1243 The natural history of Santo. Publications scientifiques du muséum, Paris, France,  
1244 pp. 267-333.

1245 - Denniston, R., Wyrwoll, K-H., Victor, J., Brown, J., Asmerom, Y., Wanamaker, A. J.,  
1246 Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D.,  
1247 Humphreys, W., 2013. A Stalagmite record of Holocene Indonesian-Australian  
1248 summer monsoon variability from the Australian tropics. *Quaternary Science*  
1249 *Reviews* 78, 155-168.



1250 - Denniston, R.F., Wyrwoll, K-H., Victor, J.P., Brown, J.R., Asmerom, Y., Wanamaker,  
1251 A.D. Jr, Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D.,  
1252 Humphreys, W.F., 2014. Corrigendum to "A stalagmite record of Holocene  
1253 Indonesian-Australian summer monsoon variability from the Australian tropics"  
1254 [Quaternary Sci. Rev. 78 (2013) 155-168], Quaternary Sci. Rev. 87, 156-158.

1255 - Dickinson, W.R., 2001. Paleoshoreline record of relative Holocene sea levels on  
1256 Pacific islands. *Earth-Science Reviews* 55, 191-234.

1257 - Dickinson, W.R., 2003. Impact of Mid-Holocene Hydro-Isostatic Highstand in  
1258 Regional Sea Level on Habitability of Islands in Pacific Oceania, *Journal of Coastal*  
1259 *Research* 19, No. 3, pp. 489-502

1260 - Dickinson, W.R., 2006. Temper sands in prehistoric Oceanian pottery: geotectonics,  
1261 sedimentology, petrography, provenance. Geological Society of America, Boulder,  
1262 USA.

1263 - Di Piazza, A., 2014. The Vanuatu "Butterfly Sail": A Polynesian Oceanic Sprintsail in  
1264 Melanesia. *Asian Perspectives* 53, 150-161.

1265 - Donders, T.H., Haberle, S.G., Hope, G.S., Wagner, F., Visschera, H., 2007. Pollen  
1266 evidence for the transition of the Eastern Australian climate system from the post-  
1267 glacial to the present-day ENSO mode. *Quaternary Science Reviews* 26, 1621-1637.

1268 - Donders, T.H., Wagner-Cremer, F., Visscher, H., 2008. Integration of proxy data and  
1269 model scenarios for the mid-Holocene onset of modern ENSO variability. *Quaternary*  
1270 *Science Reviews* 27, 571-579.

1271 - Donohue, M., Denham, T., 2012. Lapita and Proto-Oceanic. *The Journal of Pacific*  
1272 *History* 47, 443-457.

1273 - Dugas, F., Dubois, J., Lapouille, A., Lovat, R. and Ravenne, C., 1977. Structural  
1274 characteristics and tectonics of an active island arc: the New Hebrides. International  
1275 Symposium on Geodynamics in South-West Pacific, Nouméa.

1276 - Dwivedi, S., 2012. Forecasting the peak anomalies of dominant intrinsic modes of  
1277 Indian Ocean Dipole. *Deep-Sea Research* 70, 73-82.

1278 - Fall, P.L., 2005. Vegetation change in the coastal-lowland rainforest at Avai'o'vuna  
1279 Swamp, Vava'u, Kingdom of Tonga. *Late Quaternary Tropical Ecosystem Dynamics*  
1280 64, 451-459.

1281 - Fan, W., Jian, Z., Bassinot, F., Chu, Z., 2013. Holocene centennial-scale changes of the  
1282 Indonesian and South China Sea throughflows: Evidences from the Makassar Strait.  
1283 *Global and Planetary Change* 111, 111-117.

1284 - Federov, A.V., Philander, S.G.H., 2001. A stability analysis of tropical Ocean-  
1285 Atmosphere Interaction (Bridging Measurement of, and Theory for El Niño). *Journal*  
1286 *of Climate* 14, 3086-3101.

1287 - Field J., Lape P., 2010. Paleoclimates and the emergence of fortifications in tropical  
1288 Pacific Islands. *Journal of Anthropological Archaeology* 29, 113-124.

1289 - Firth, C., Handley, H., Cronin, S., Turner, S., 2014. The eruptive history and chemical  
1290 stratigraphy of a post-caldera, steady-state volcano: Yasur, Vanuatu. *Bulletin of*  
1291 *Volcanology* 76, 837.

1292 - Fitzpatrick, S.C., Callaghan, R.T., 2013. Estimating trajectories of colonisation to the  
1293 Mariana Islands, western Pacific. *Antiquity* 87, 840-853.

1294 - Fleitmann, D., Burns, S., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A., Matter, A.,  
1295 2003. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from  
1296 Southern Oman. *Science* 300, 1737-1739.

1297 - Forsyth, A., Nott, J., Bateman, M., 2010. Beach ridge plain evidence of a variable  
1298 late-Holocene tropical cyclone climate, North Queensland, Australia.  
1299 *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 297, 707-716.

1300 - Frogner Kockum, P.C., Herbert, R.B., Gislason, S.R., 2006. A diverse ecosystem  
1301 response to volcanic aerosols. *Chemical Geology* 231, 57-66.

1302 - Gagan, M.K., Hendy, E.J., Haberle, S.G., Hantoro, W.S., 2004. Post-glacial evolution of  
1303 the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern oscillation. *Quaternary*  
1304 *International* 118-119, 127 - 143.

1305 - Galipaud, J-C., Kelly, M.C.S., 2007. Makué (Aore Island, Santo, Vanuatu): A new  
1306 Lapita site in the ambit of New Britain obsidian distribution. *Terra Australis* 26, 151-  
1307 162.

1308 - Galipaud, J-C., Reepmeyer, C., Torrence, R., Kelloway, S., White, P., 2014. Long-  
1309 distance connections in Vanuatu: New obsidian characterisations for the Makué site,  
1310 Aore Island. *Archaeol. Oceania* 49, 110-116.

1311 - Ganopolski, A., Kubatzki, C., Claussen, M., Brovkin, V., Petoukhov, V., 1998. The  
1312 influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-  
1313 Holocene. *Science* 280, 1916-1919.

1314 - Gao, C., Robock, A., Self, S., Witter, J.B., Steffenson, J.P., Clausen, H.B., Siggaard-  
1315 Andersen, M-L., Johnsen, S., 2006. The 1452 or 1453 A.D. Kuwae eruption signal  
1316 derived from multiple ice core records: Greatest volcanic sulfate event of the past  
1317 700 years. *Journal of Geophysical Research* 111, D12107.

1318 - Garanger, J., 1972. *Archéologie des Nouvelles-Hébrides: contribution à la*  
1319 *connaissance des îles du centre*. Publications de la Société des Océanistes, Paris,  
1320 France.

1321 - Garling, S.J., 2007. Post-Lapita Evolutions or Revolutions? Interaction and  
1322 Exchange in Island Melanesia: The View from the Tanga Islands. Thèse de doctorat,  
1323 Australian National University, Canberra.

1324 - Gifford, E.W., Shutler, Jr., R., 1956. Archaeological Excavations in New Caledonia,  
1325 University of California press, Berkeley, USA.

1326 - Giggenbach, W.F., 1996. Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa, R.,  
1327 Tilling, R.I. (Ed.), Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards. Springer-Verlag,  
1328 Berlin, Allemagne, pp. 211-256.

1329 - Gillison, A.N., 1975. Phytogeographical Relationships of the Northern Islands of the  
1330 New Hebrides. Philosophical Transaction of the Royal Society B Biological Sciences  
1331 272, 385-390.

1332 - Goodwin, I.D., Browning, S., Lorrey, A.M., Mayewski, P.A., Phipps, S.J., Bertler, N.A.N.,  
1333 Edwards, R.P., Cohen, T.J., van Ommen, T., Curran, M., Barr, C., Stager, J.C., 2013. A  
1334 reconstruction of extratropical Indo-Pacific sea-level pressure patterns during the  
1335 Medieval Climate Anomaly. *Climate Dynamics* 43, 1197-1219.

1336 - Gosden, C., 1989. Prehistoric social landscape of the Arawe Islands, West New  
1337 Britain, Papua New Guinea. *Archaeology in Oceania* 24, 45-58.

1338 - Graham, N.E., Barnett, T.P., 1995. ENSO and ENSO-related predictability. II:  
1339 Northern hemisphere 700-mb height prediction based on a hybrid coupled ENSO  
1340 model. *Journal of Climate* 8, 544-549.

1341 - Green R.C., 1979. Lapita. In : Jennings, J. (Ed.), *The Prehistory of Polynesia*. ANU  
1342 Press, Canberra. Australie.

1343 - Green R. C., 2000. Lapita and the cultural models for intrusion, integration and  
1344 innovation. In : Anderson, A., Murray, T. (Ed.), *Australian Archaeologist: collected  
1345 papers in honour of Jim Allen*, Canberra, Australie, pp. 372-392.

1346 - Green R. C., 2003. The Lapita horizon and traditions – Signature for one set of  
1347 oceanic migrations. In: Sand, C. (Ed), Pacific Archaeology: assessments and  
1348 prospects Proceedings of the Conference for the 50th anniversary of the first Lapita  
1349 excavation. Koné-Nouméa 2002, Les Cahiers de l'archéologie en Nouvelle-Calédonie,  
1350 Nouméa, Nouvelle-Calédonie, pp. 95-120.

1351 - Gupta, A., Anderson, D., Overpeck, J., 2003. Abrupt changes in the Asian southwest  
1352 monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. Nature  
1353 421, 354-357.

1354 - Haberle, S. G., Hope, G. S., van der Kaars, S., 2001. Biomass burning in Indonesia and  
1355 Papua New Guinea : natural and human induced fire events in the fossil record.  
1356 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 171, 259-268.

1357 - Hamilton, A.M., Klein, E.R., Austin, C.C., 2010. Biogeographic Breaks in Vanuatu, a  
1358 Nascent Oceanic Archipelago. Pacific Science 64, 149-159.

1359 - Haug, G., Hughen, K., Sigman, D., Peterson, L., Röhl, U., 2001. Southward migration  
1360 of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. Science 293, 1304-  
1361 1308.

1362 -Hoffman, A., 2007. Looking to Epi: further conséquences of the Kuwae eruption,  
1363 central Vanuatu, AD 1452. Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association 26, 62-  
1364 71.

1365 - Hope, G., Kershaw, A.P., Kaars, S. van der, Xiangjun, S., Liew, P.-M., Heusser, L.E.,  
1366 Takahara, H., McGlone, M., Miyoshi, N., Moss, P.T., 2004. History of vegetation and  
1367 habitat change in the Austral-Asian region. Quaternary International 118-119, 103-  
1368 126.

1369 - Hope, G., O'Dea, D., Southern, W., 1999. Holocene vegetation histories in the  
1370 Western Pacific: alternative records of human impact. In: Galipaud, J-C., Lilley, I.

1371 (Ed.), *Le Pacifique de 5000 à 2000 avant le présent : suppléments à l'histoire d'une*  
1372 *colonisation = The Pacific from 5000 to 2000 BP: colonization and transformations.*  
1373 IRD, Paris, France, pp. 387-404.

1374 - Horrocks, M., Bedford, S., 2005. Microfossil analysis of Lapita deposits in Vanuatu  
1375 reveals introduced Araceae (aroids). *Archaeology in Oceania* 40, 67-74

1376 - Horrocks, M., Bedford, S., Spriggs, 2009. A short note on banana (*Musa*) phytoliths  
1377 in Lapita, immediately post-Lapita and modern period archaeological deposits from  
1378 Vanuatu. *Journal of Archaeological Science* 36, 2048-2054.

1379 - Hu, C., Henderson, G., Huang, J., Xie, S., Sun, Y., Johnson, K., 2008. Quantification of  
1380 Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and*  
1381 *Planetary Science Letters* 266, 221-232.

1382 - Hung, C-W., Yanai, M., 2004. Factors contributing to the onset of the Australian  
1383 summer monsoon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 130, 739-  
1384 758.

1385 - Irwin, G., 1992. *The Prehistoric Exploration and Colonization of the Pacific.*  
1386 Cambridge University Press, Cambridge, UK.

1387 - Irwin, G., 2008. Pacific seascapes, canoe performance, and a review of Lapita  
1388 voyaging with regards to theories of migration. *Asian Perspectives* 47, 12-27.

1389 - Jones, M., Roberts, N., Leng, M., Türkeş, M., 2006. A high-resolution late Holocene  
1390 lake isotope record from Turkey and links to North Atlantic and monsoon. *Climate*  
1391 *Geology* 34, 361-364.

1392 - Keith, P., 2011. Rivers and other freshwater habitats. In: Bouchet, P., Le Guyader,  
1393 H., Pascal, O. (Ed.), *The natural history of Santo.* Publications scientifiques du  
1394 muséum, Paris, France pp. 239-264.

1395 - Khider, D., Stott, L.D., Emile-Geay, J., Thunell, R., Hammond, D.E., 2011. Assessing El  
1396 Niño Southern Oscillation variability during the past millennium. *Paleoceanography*  
1397 26, PA3222.

1398 - Kiladis G.N., K. M. Weickmann, K.M., 1992. Circulations anomalies associated with  
1399 tropical convection during northern winter. *Monthly Weather Review* 120, 1900–  
1400 1923.

1401 - Kilbourne, K.H., Quinn, T.M., Taylor, F.W., Delcroix, T., Gouriou, Y., 2004. El Nino  
1402 Southern Oscillation-related salinity variations recorded in the skeletal  
1403 geochemistry of a *Porites* coral from Espiritu Santo, Vanuatu. *Paleoceanography* 19,  
1404 PA4002.

1405 - Kinaston, R., Bedford, S., Richards, M., Hawkins, S., Gray, A., Jaouen, K., Valentin, F.,  
1406 Buckley, H., 2014a. Diet and Human Mobility from the Lapita to the Early Historic  
1407 Period on Uripiv Island, Northeast Malakula, Vanuatu. *PLoS ONE* 9, e104071.

1408 - Kinaston, R., Buckley H., Valentin, F., Bedford, S., Spriggs, M., Hawkins, S., Herrscher,  
1409 E., 2014b. Lapita Diet in Remote Oceania: New Stable Isotope Evidence from the  
1410 3000-Year-Old Teouma Site, Efate Island, Vanuatu. *PLoS ONE* 9, e90376.

1411 - Kirch, P.V., 1984. *The Evolution of the Polynesian Chiefdoms*. Cambridge University  
1412 Press, Cambridge, UK.

1413 - Kirch, P.V., 1997. *The Lapita Peoples: Ancestors of the Oceanic World, The Peoples*  
1414 *of South-East Asia and the Pacific*. Blackwell publishing, Hoboken, USA.

1415 - Kirch, P., Hunt, T., 1988. *Archaeology of the Lapita Cultural Complex: a critical*  
1416 *Review*. T. Burke Memorial Washington State Museum, Research Report 5, Seattle,  
1417 USA.

1418 -Konecky, B., Russell, J., Vuille, M., Rehfekd, K., 2014. The Indian Ocean Zonal Mode  
1419 over the past millennium in observed and modeled precipitation isotopes.  
1420 Quaternary Science Reviews 103, 1-18.

1421 - Kug, J., Sooraj, K., Fei-Fei, J., Luo, J-J., Kwon, M., 2009. Impact of Indian Ocean Dipole  
1422 on high-frequency atmospheric variability over the Indian Ocean. Atmospheric  
1423 Research 94, 134-139.

1424 - Kumar, R., Nunn, P., Dickinson, W., 2004. The emerging pattern of earliest human  
1425 settlement in Fiji: four new Lapita sites on Viti Levu Island. Archaeology in New  
1426 Zealand 47, 108-117.

1427 - Lebot, V., Merlin, M., Lindstrom, L. 1997. Kava The Pacific Elixir. Healing Arts Press,  
1428 Rochester, USA.

1429 - Lecolle, J.F., Bokilo, J.E., Bernat, M., 1990. Soulèvement et tectonique de l'île d'Éfaté  
1430 (Vanuatu) arc insulaire des Nouvelles-Hébrides, au cours du Quaternaire récent.  
1431 Datations de terrasses soulevées par la méthode U/Th. Marine Geology 94, 251-270.

1432 - Loubere, P., Creamer, W., Haas, J., 2013. Evolution of the El Nino-Southern  
1433 Oscillation in the late Holocene and insolation driven change in the tropical annual  
1434 SST cycle. Global and Planetary Change 100, 129-144.

1435 - Luyendyk, B.P., Bryan, W.B., Jezek, P.A., 1974. Shallow structures of the New  
1436 Hebrides island arc. The Geological Society of America 85, 1287-1300.

1437 - Lynch, J., 2004. The Efate-Erromango Problem in Vanuatu Subgrouping. Oceanic  
1438 Linguistics 43, 311-338.

1439 - Madden, R.A., Julian, P., 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind  
1440 in the tropical pacific. Journal of Atmospheric Sciences 28, 702-708.

1441 - Mallick, D.I.J, Ash, R.P., 1975. Geology of the southern Banks Islands: New Hebrides.  
1442 Geological Survey Regional Report, Port Vila, Vanuatu.



1443 - Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D.,  
1444 Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the  
1445 Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326, 1256-1260.

1446 - Martin, P.S., Steadman, D.W., 1999. Prehistoric Extinctions on Islands and  
1447 Continents. In: MacPhee, R.D.E. (Ed.), *Extinctions in Near Time, Advances in*  
1448 *Vertebrate Paleobiology*. Springer US, New York, USA, pp. 17-55.

1449 - Masse, W.B., Liston, J., Carucci, J., Athens, S., 2006. Evaluating the effects of climate  
1450 change on environment, resource depletion, and culture in the Palau Islands  
1451 between AD 1200 and 1600. *Quaternary International* 151, 106-132.

1452 - Matisoo-Smith, E., 2015. Ancient DNA and the human settlement of the Pacific: A  
1453 review. *Journal of Human Evolution* 79, 93-104.

1454 - Matthey, D., Stephens, M., Garcia, A. E., Hoffmann, D., Dredge, J.A., Fisher, R.E., Lowry,  
1455 D., 2011. The nature of the Medieval Warm Period-Little Ice Age Transition in an  
1456 annually resolved speleothem record from Voli Voli Cave, Fiji. *Proceedings of the*  
1457 *AGU Fall Meeting*, San Francisco.

1458 - McBride, J., 1987. The Australian summer monsoon. In: Chang, C., Krishnamurti, T.  
1459 (Ed.), *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 203-231.

1460 - McCall, G., LeMaitre, R., Malahoff, A., Robinson, G., Stephenson, P., 1970. The  
1461 geology and geophysics of the ambrym caldera, New Hebrides. *Bulletin of*  
1462 *Volcanology* 34, 681-696.

1463 - McGregor, H.V., Gagan, M.K., 2004. Western Pacific coral  $\delta^{18}\text{O}$  records of anomalous  
1464 Holocene variability in the El Niño-Southern Oscillation. *Geophysical Research*  
1465 *Letters* 31, L11204.

1466 - McPhaden, M.J., Yu, X., 1999. Equatorial waves and the 1997-1998 El Niño.  
1467 *Geophysical Research Letters* 26, 2961-2964.

1468 - McNiven, I.J., David, B., Richards, T., Aplin, K., Asmussen, B., Mialanes, J., Leavesley,  
1469 M., Faulkner, P., Ulm, S., 2011. New Direction in Human Colonisation of the Pacific:  
1470 Lapita Settlement of South Coast New Guinea. *Australian Archaeology* 72, 1-6.

1471 - McRobie, F.H., Stemler, T., Wyrwoll, K.-H., 2015. Transient coupling relationships of  
1472 the Holocene Australian monsoon. *Quaternary Science Reviews* 121, 120-131.

1473 - Mohtadi, M., Romero, O.E., Kaiser, J., Hebbeln, D., 2007. Cooling of the southern high  
1474 latitudes during the Medieval Period and its effect on ENSO. *Quaternary Science*  
1475 *Reviews* 26, 1055-1066.

1476 - Monzier, M., Robin, C., Eisen, J-P., 1994. Kuwae (~1425 A.D): the forgotten caldera.  
1477 *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59, 207-218.

1478 - Morishita, Y., Heki, K., 2008. Characteristic precipitation patterns of El Niño/La  
1479 Niña in time-variable gravity fields by GRACE. *Earth and Planetary Science Letters*  
1480 272, 677-682.

1481 - Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002. Variability of El Niño-  
1482 Southern Oscillation activity at millennialtimescales during the Holocene epoch.  
1483 *Nature* 162-165.

1484 - Munzinger, J., Lowry, P.P., 2011. Principal types of vegetation occurring on Santo. In:  
1485 Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Ed.), *The natural history of Santo*.  
1486 *Publications scientifiques du muséum, Paris*, pp. 76-88.

1487 - Nan, Q., Li, T., Chen, J., Nigma, R., Yua, X., Xu, Z., Yang, Z., 2014. Late Holocene (~2  
1488 ka) East Asian Monsoon variations inferred from river discharge and climate  
1489 interrelationships in the Pearl River Estuary. *Quaternary Research* 81, 240-250.

1490 - Neef, G., Veeh, H.H., 1977. Uranium series ages and late Quaternary uplift in the  
1491 New Hebrides. *Nature* 420, 682-683.

1492 - Neelin, J.D., Latif, M., 1998. El niño dynamics. *Physics Today* 51, 32-36.

1493 - Newell, R.E., 1979. Climate and the ocean. *American Scientist* 67, 405-416.

1494 - Nott, J., Hayne, M., 2001. High frequency of 'super-cyclones' along the Great Barrier  
1495 Reef over the past 5,000 years *Nature* 413, 508-512.

1496 - Nott, J., Haig, J., Neil, H., Gillieson, D., 2007. Greater frequency variability of  
1497 landfalling tropical cyclones at centennial compared to seasonal and decadal scales.  
1498 *Earth and Planetary Science Letters* 255, 367-372.

1499 - Nott, J., Smithers, S., Walsh, K., Rhodes, E., 2009. Sand beach ridges record 6000  
1500 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia.  
1501 *Quaternary Science Reviews* 28, 1511-1520.

1502 - Noury, A, Galipaud, J-C., 2011. *Les Lapita, nomades du Pacifique*. IRD édition,  
1503 Marseille, France.

1504 - Nunn, P.D., 1997. Late Quaternary environmental changes on Pacific islands:  
1505 controversy, certainty and conjecture. *Journal of Quaternary Science* 12, 443-450.

1506 - Nunn, P.D., 2003. Nature-Society Interaction in the Pacific Islands. *Geografiska*  
1507 *Annaler* 85, 219-229.

1508 - Oppo, D.W., Rhosenthal, Y., Linsley, B.K., 2009. 2,000-year-long temperature and  
1509 hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool. *Nature Letters* 460,  
1510 1113-1116.

1511 - Pang, K. D., 1993. Climatic impact of the mid-fifteenth century Kuwae caldera  
1512 formation, as reconstructed from historical and proxy data, *Eos Transaction AGU* 74,  
1513 106.

1514 - Partin, J., Cobb, K., Adkins, J., Clark, B., Fernandez, D., 2007. Millennial-scale trends  
1515 in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum. *Nature* 449,  
1516 452-455.

1517 - Pawley, A., 2002. The Austronesian Dispersal: Languages, Technologies and People.  
1518 In : Bellwood, P., Renfrew, C. (Ed.), Examining the forming/language dispersal  
1519 hypothesis. McDonald Institute of Archaeological Research, Cambridge, UK, pp. 251-  
1520 273.

1521 -Pawley, A., 2007. The origins of Early Lapita culture: the testimony of historical  
1522 linguistics. *Terra Australis* 26, 17-50.

1523 - Petchey, F., 2001. Radiocarbon determinations from the Mulifanua Lapita site,  
1524 Upolu, Western Samoa. *Radiocarbon* 43, 63-68.

1525 - Petchey, F., Spriggs, M., Bedford, S., Valentin, F., Buckley, H., 2014. Radiocarbon  
1526 dating of burials from the Teouma Lapita cemetery, Efate, Vanuatu. *Journal of*  
1527 *Archaeological Science* 50, 227-242.

1528 - Pineda, R., Galipaud, J-C., 1998. Évidences archéologiques d'une surrection  
1529 différentielle de l'île de Malo (archipel du Vanuatu) au cours de l'Holocène récent.  
1530 *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Serie IIA - Earth Planetary Science*  
1531 327, 777-779.

1532 - Poupin, J., Juncker, M., 2010. Guide Des Crustacés Décapodes Du Pacifique Sud. SPC  
1533 FAME Digital Library, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

1534 - Prebble, M., Wilmshurst, J.M., 2008. Detecting the initial impact of humans an  
1535 introduced species on island environments in Remote Oceania using palaeoecology.  
1536 *Biological Invasions* 11, 1529-1556.

1537 -Quantin, P., 1975. Soils of the New Hebrides islands. *Philosophical Transactions of*  
1538 *the Royal Society B: Biological Sciences* 272, 287-292.

1539 -Reepmayer, C., Clark, G., 2010. Post-colonization interaction between Vanuatu and  
1540 Fiji reconsidered: The re-analysis of obsidian from Lakeba Island, Fiji. *Archaeometry*  
1541 52, 1-18.

1542 - Rein, B., Lückge, A., Sirocko, F., 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the  
1543 Medieval period. *Geophysical Research Letters* 31, L17211.

1544 - Renssen, H., Goosse, H., Fichefet, T., Masson-Delmotte, V., Koç, N., 2005. The  
1545 Holocene climate evolution in the high-latitude Southern Hemisphere simulated by a  
1546 coupled atmosphere–sea ice–ocean–vegetation model. *The Holocene* 15, 951-964.

1547 - Rind, D., 2000. Relating paleoclimate data and past temperature gradients: some  
1548 suggestive rules. *Quaternary Science Reviews* 19, 381-390.

1549 - Robin, C., Eissen, J-P., Monzier, M., 1993. Giant tuff cone and 12-km-wide associated  
1550 caldera at Ambrym Volcano (Vanuatu, New Hebrides Arc). *Journal of Volcanology  
1551 and Geothermal Research* 55, 225-238.

1552 - Saji, N., Goswami, B., Vinayachandran, P., Yamagata, T., 1999. Dipole mode in the  
1553 tropical indian ocean. *Nature* 401, 360–36.‡

1554 - Sand, C., 2010. *Lapita calédonien : Archéologie d'un premier peuplement insulaire  
1555 océanien*. Société des Océanistes, Paris, France.

1556 - Sand, C., Coote, K., Bole, J., Ouetcho, A., 1998. A pottery pit at locality WK0013A,  
1557 Lapita (New Caledonia). *Archaeology in Oceania* 33, 37-43.

1558 - Sandweiss, D.H., Maasch, K.A., Burger, R.L., Richardson, J.B., Rollins, H.B., Clement,  
1559 A., 2001. Variation in Holocene El Niño frequencies: climate records and cultural  
1560 consequences in ancient Peru. *Geology* 29, 603-606.

1561 - Schmid, M., 1987. Conditions d'évolution et caractéristiques du peuplement végétal  
1562 insulaire en Mélanésie occidentale : Nouvelle-Calédonie, Vanuatu. *Bulletin de la  
1563 Société Zoologique de France* 112, 233-254.

1564 - Schopf, P., Suarez, M., 1988. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model.  
1565 *Journal of Atmospheric Sciences* 45, 549–566.

1566 - Scott, R.M., Buckley, H.R., Spriggs, M., Valentin, F., Bedford, S., 2010. Identification of  
1567 the first reported Lapita cremation in the Pacific Islands using archaeological,  
1568 forensic and contemporary burning evidence. *Journal of Archaeological Science* 37,  
1569 901-909.

1570 - Servant, M., Servant-Vildary, S., 2003. Holocene precipitation and atmospheric  
1571 changes inferred from river paleowetlands in the Bolivian Andes. *Palaeogeography,*  
1572 *Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 187-206.

1573 - Sheppard P., Green R. C., 1991. Spatial analysis of the Nenumbo (SE-RF-2) Lapita  
1574 site, Solomon Islands. *Archaeology in Oceania* 26, 89-101.

1575 - Sheppard, P., Walter, R., 2006. A revised model of Solomon Islands culture history.  
1576 *Journal of the Polynesian Society* 115, 47-76.

1577 - Shutler, M.E., Shutler, Jr., R., Bedford, S., 2002. Further detail on the Archaeological  
1578 Explorations in the Southern New Hebrides, 1963–1964. In: Bedford, S., Sand, C. and  
1579 D. Burley, D. (Ed.), *Fifty Years in the Field: Essays in Honour and Celebration of*  
1580 *Richard Shutler Jrs Archaeological Career.* New Zealand Archaeological Association,  
1581 Auckland, Nouvelle-Zélande, pp.189-206.

1582 - Siméoni, P., 2009. *Atlas du Vanouatou (Vanuatu).* Géo-consulte, Port Vila, Vanuatu.

1583 - Smith, A.C., 1979. *Flora vitiensis nova,* Pacific tropical botanical garden, Honolulu,  
1584 Hawaiï.

1585 - Specht, J., 2007. Small islands in the big picture: the formative period of Lapita in  
1586 the Bismarck Archipelago. *Terra australis* 26, 51-70.

1587 - Specht, J., Torrence, R., 2007. Lapita all over: Land-use on the Willaumez Peninsula,  
1588 Papua New Guinea. *Terra australis* 26, 71-96.

1589 -Spriggs, M., 2004. Is there Life after Lapita, and do you remember the 60s? The  
1590 Post-Lapita sequences of the Western Pacific. In: Attenbrow, V., Fullager, R. (Ed.), A

1591 Pacific Odyssey: Archaeology and Anthropology in the Western Pacific. Papers in  
1592 Honor of Jim Specht. Sydney, Australie, pp. 139-144.

1593 - Spriggs, M., 1997. The Island Melanesians. Blackwell publishings, Hoboken, USA.

1594 - Spriggs, M., 2010. Geomorphic and archaeological consequences of human arrival  
1595 and agricultural expansion on Pacific Islands: a reconsideration after 30 years of  
1596 debate. Terra Australis 32 239-252.

1597 - Steinke, S., Mohtadi, M., Prange, M., Varma, V., Pittauerova, D., Fischer, H.W., 2014.  
1598 Mid- to Late-Holocene Australian-Indonesian summer monsoon variability.  
1599 Quaternary Science Reviews 93, 142-154.

1600 - Stevenson, J., 2004. A late-Holocene record of human impact from the southwest  
1601 coast of New Caledonia. The Holocene 14, 88-98.

1602 - Storey, A.A., Ladefoged, T., Matisoo-Smith, E.A., 2008. Counting your chickens:  
1603 density and distribution of chicken remains in archaeological sites of Oceania.  
1604 International Journal of Osteoarchaeology 18, 240-261.

1605 - Sun, D., Gagan, M.K., Cheng, H., Scott-Gagan, H., Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Su, R.,  
1606 2005. Seasonal and interannual variability of the Mid-Holocene East Asian monsoon  
1607 in coral  $\delta^{18}O$  records from the South China Sea. Earth and Planetary Science Letters  
1608 237, 69-84.

1609 - Suppiah, R., 1992. The Australian summer monsoon: a review. Progress in Physical  
1610 Geography 16, 283-318.

1611 - Terray, P., Dominiak, S., 2005. Indian ocean sea surface temperature and el niño-  
1612 southern oscillation : A new perspective. Journal of Climate 18, 1351-1368.

1613 - Terrel, J., 2004. Introduction: "Austronesia" and the great Austronesian migration.  
1614 World Archaeology 36, 586-590.

1615 - Thollot, P., 1996. Les poissons de mangrove du lagon sud-ouest de Nouvelle-  
1616 Calédonie. ORSTOM Editions, Paris, France

1617 - Thompson, L., Henderson, K., Mosley-Thompson, E., Lin, P., 2000. The tropical ice  
1618 core record of ENSO. In: Diaz, H.F., Markgraf, V. (Ed.) El Niño and the Southern  
1619 Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge  
1620 University Press, Cambridge, UK, pp.325-357.

1621 - Torrence, R., 2002. Cultural landscapes on Garua Island, Papua New Guinea  
1622 *Antiquity* 76, 766-776.

1623 - Tudhope, A., Chilcott, C., McCulloch, M., Cook, E., Chappell, J., Ellam Lea, R., Lough,  
1624 D., Shimmield, J., 2001. Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a  
1625 glacial-interglacial cycle. *Science* 291, 1511-1517.

1626 - Valentin, F., Buckley, H.R., Herrscher, E., Kinaston, R., Bedford, S., Spriggs, M.,  
1627 Hawkins, S., Neal, K., 2010. Lapita subsistence strategies and food consumption  
1628 patterns in the community of Teouma (Efate, Vanuatu). *Journal of Archaeological*  
1629 *Science* 37, 1820-1829.

1630 - Valentin, F., Herrscher, E., Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., 2014. Evidence for  
1631 Social and Cultural Change in Central Vanuatu Between 3000 and 2000 BP:  
1632 Comparing Funerary and Dietary Patterns of the First and Later Generations at  
1633 Teouma, Efate. *Journal of Island and Coastal Archaeology* 9, 381-399.

1634 - Vargas, G., Rutilant, J., Ortlieb, L., 2006. ENSO tropical-extratropical climate  
1635 teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid  
1636 coast of western South America (17°-24°S). *Earth and Planetary Science Letters*  
1637 249, 467-483.

1638 - Vincent, D., 1994. The South-Pacific Convergence Zone (SPCZ) - a Review. *Monthly*  
1639 *Weather Review* 122, 1949-1970.



- 1640 - Waliser, D., Gautier, C.A., 1993. Satellite-derived Climatology of the ITCZ. *Journal of*  
1641 *Climate* 6, 2162–2174.
- 1642 - Walker, G., Bliss, E. 1932. *World weather*. Royal Meteorological Society 4, 53-84.
- 1643 - Walter, A., Lebot, V., Sam, C., 2003. *Jardins d’Océanie*. IRD, Paris, France.
- 1644 - Wanner, H., Bütikofer, J., 2008. Holocene Bond cycles : real or imaginary ?  
1645 *Geografie-Sborník CGS* 4, 338-350.
- 1646 - Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M., Dykoski, C.,  
1647 Li, X., 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic  
1648 climate. *Science* 308, 854-857.
- 1649 - Ward, G.K., 1979. *Prehistoric Settlement and Economy of a Tropical Small Island*  
1650 *Environment: The Banks Islands, Insular Melanesia*. Thèse de doctorat, Australian  
1651 National University, Canberra.
- 1652 - Wheatley, J.I., 1992. *A guide to the common trees of Vanuatu*, The Republic of  
1653 Vanuatu 's Department of Forestry, Port Vila, Vanuatu.
- 1654 - Wheeler, M., McBride, J., 2011. Australasian monsoon. In: Lau, W., Waliser, D. (Ed.),  
1655 *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-ocean Climate System*. Springer, Berlin,  
1656 Allemagne, pp. 147-198.
- 1657 - Wheeler, M.C., Hendon, H.H., Cleland, S., Meinke, H., Donald, A., 2009. Impacts of the  
1658 Madden-Julian Oscillation on Australian rainfall and circulation. *Journal of Climate*  
1659 22, 1482-1498.
- 1660 - White, J.P., Allen, J., 1980. Melanesian prehistory: Some recent advances. *Science*  
1661 207, 728-734.
- 1662 - Witter, J.B., Self, S., 2006. The Kuwae (Vanuatu) eruption of AD 1452: Potential  
1663 magnitude and volatile release, *Bulletin of Volcanology* 68, 1-18.

1664 - Wirmann, D., Eagar, S.H., Harper, M.A., Leroy, É., Sémah, A.-M., 2011a. First  
1665 insights into mid-Holocene environmental change in central Vanuatu inferred from  
1666 a terrestrial record from Emaotfer Swamp, Efaté Island. *Quaternary Science Reviews*  
1667 30, 3908-3924.

1668 - Wirmann, D., Sémah, A.-M., Debenay, J.-P., Chacornac-Rault, M., 2011b. Mid- to late  
1669 Holocene environmental and climatic changes in New Caledonia, southwest tropical  
1670 Pacific, inferred from the littoral plain Gouaro-Déva. *Quaternary Research* 76, 229-  
1671 242.

1672 - Wu, R., Kirtman, B., 2005. Roles of indian and pacific ocean air-sea coupling in  
1673 tropical atmospheric variability. *Climate Dynamics* 25, 155-170.

1674 - Wyrski, K., 1975: El Niño--the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to  
1675 atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography* 5, 572-584.

1676 - Wyrski, K., 1989. Some thoughts about the west Pacific warm pool. *Western Pacific*  
1677 *international meeting and workshop on Toga Coare : proceedings*, Nouméa.

1678 - Xie, S-P., Saito, K., 2001. Formation and Variability of a Northerly ITCZ in a Hybrid  
1679 Coupled AGCM: Continental Forcing and Oceanic-Atmospheric Feedback. *Journal of*  
1680 *Climate* 14, 1262-1276.

1681 - Yann, H., Sun, L., Wang, Y., Huang, W., Qiu, S., Yang, C., 2011. A record of the  
1682 Southern Oscillation Index for the past 2,000 years from precipitation proxies.  
1683 *Nature Geoscience* 4, 611-614.

1684 - Zhang, Z., Leduc, G., Sachs, J.P., 2014. El Niño evolution during the Holocene  
1685 revealed by a biomarker rain gauge in the Galápagos Islands. *Earth and Planetary*  
1686 *Science Letters* 404, 420-434.

1687 relations atmosphère-océan Pacifique, déterminant les saisons humides et sèches.  
1688 La faune et la flore sont principalement originaires d'Asie du sud-est mais

1689 l'isolement de l'archipel, la taille des îles et le gradient climatique entre le nord et le  
1690 sud sont à l'origine de la présence de certaines espèces et sous espèces endémiques  
1691 à l'archipel, voire à quelques îles. Les premières populations humaines n'ont atteint  
1692 l'archipel qu'autour de 3200 ans BP. Entre 3200 et 2900 ans BP, la culture Lapita,  
1693 caractérisée par des poteries très décorées, est commune à tout le Vanuatu. Après  
1694 2900 ans BP, les cultures divergent et diffèrent d'une île à une autre. A partir de 600  
1695 ans BP, la culture polynésienne domine au Vanuatu.

1696

1697 Mots-clés

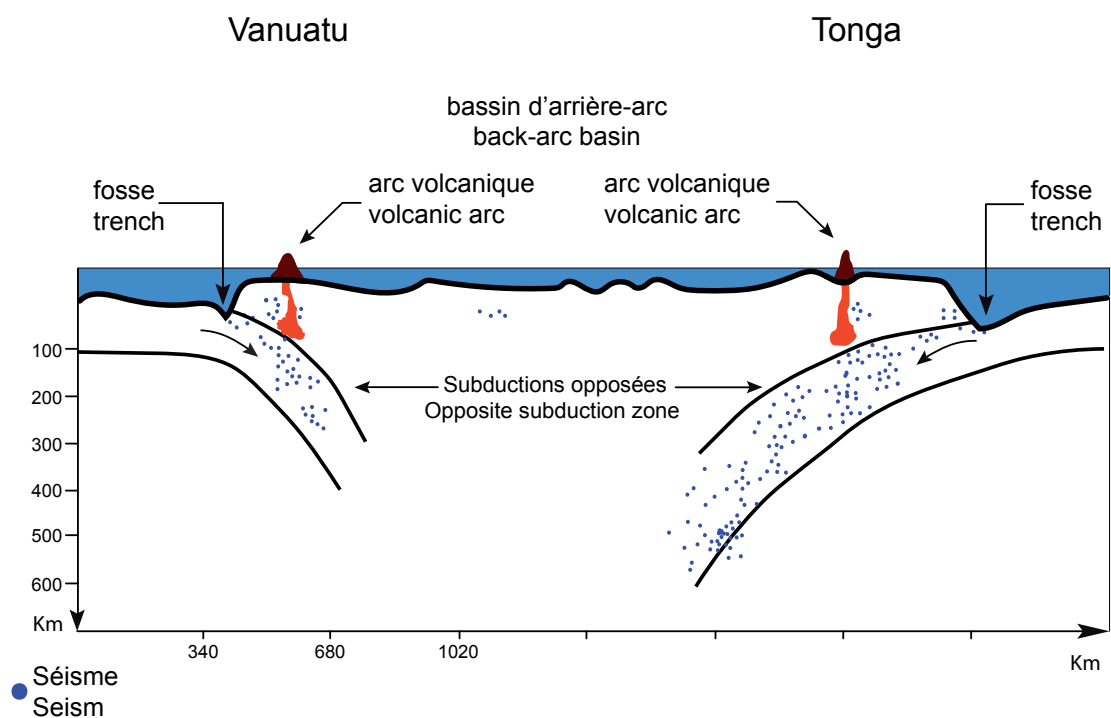
1698 Vanuatu, Holocène, Tectonique, Volcanisme, Climat, Flore et Faune, Histoire de  
1699 l'Homme.

1700

1701 **ABSTRACT**

1702 The first Vanuatu archaeological site discovery dates back to the 60s, then the  
1703 scientific and archaeological knowledge of this archipelago have increased.  
1704 Nevertheless, the human activities-palaeoenvironmental changes relation in  
1705 Vanuatu is still a matter of debate. In order to better determine this relation,  
1706 reviewing the literature on past and actual environment is needed. This paper  
1707 presents here a state of knowledge on Vanuatu geology, climate, biodiversity and  
1708 archaeology, from the mid-Holocene to our present-day. The young archipelago  
1709 results from strong volcanic and tectonic activity, due to the active subduction zone  
1710 between Australian and Pacific plates. The atmosphere-ocean interactions  
1711 determine the wet and dry seasons. Fauna and flora are principally derived from  
1712 Southeast Asia. The occurrence of several species and subspecies endemic to the

1713 archipelago, if not to some islands, is probably due to the Vanuatu isolated location,  
1714 the size of the islands and the climatic gradient between north and south. The first  
1715 human populations reached the archipelago around 3200 yr BP. The Lapita culture,  
1716 characterized by decorated potteries, is shared across the whole Vanuatu between  
1717 3200 and 2900 yr BP. After 2900 yr BP, cultures differ from one island to another.  
1718 After 600 yr BP, the Polynesian culture dominates in Vanuatu.  
1719  
1720 Keywords  
1721 Vanuatu, Holocene, Tectonic, Volcanism, Climate, Flora and Fauna, Human history.



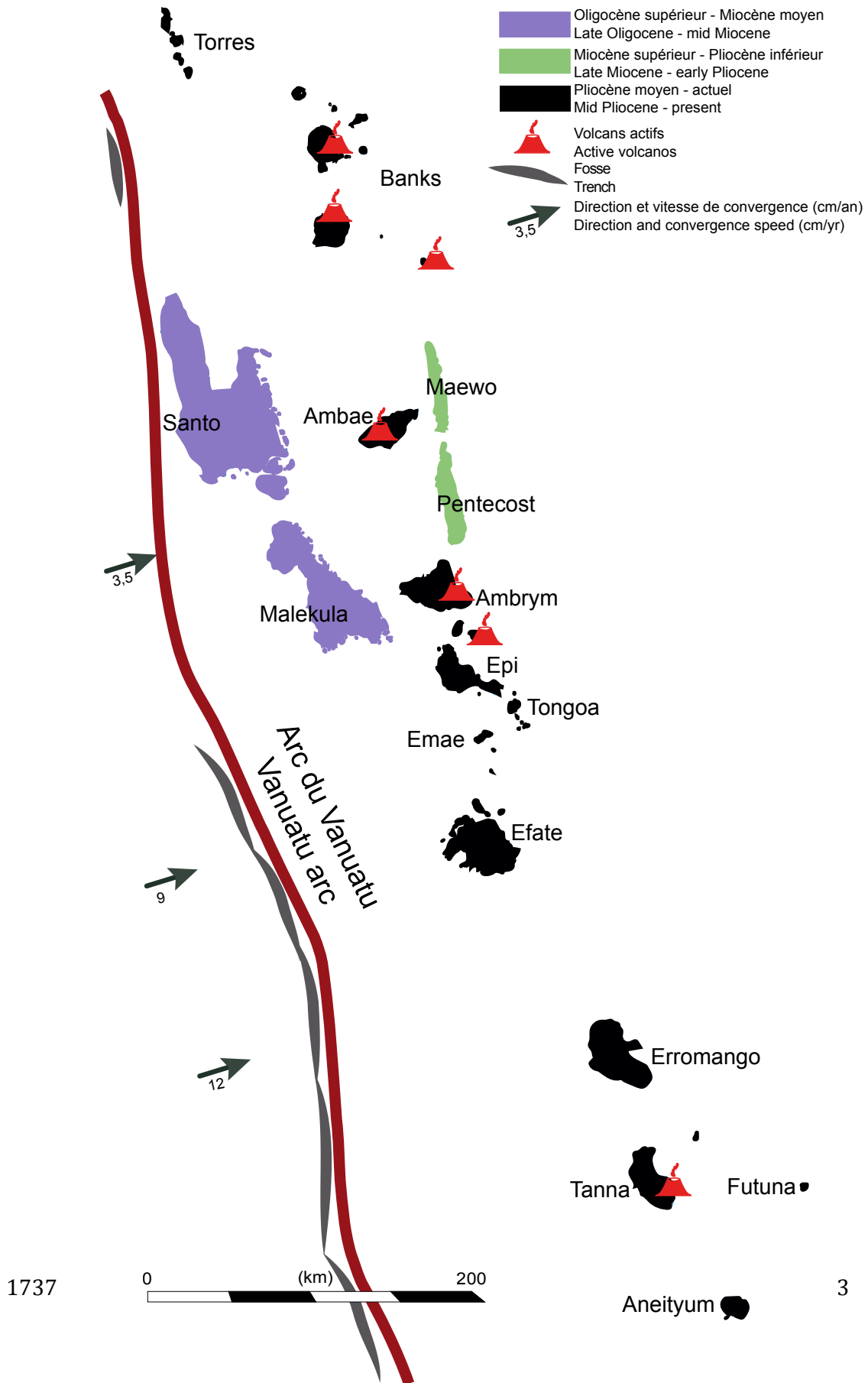
1722

1723 Figure 1 : La convergence actuelle entre les plaques Pacifique et Australie est  
 1724 caractérisée par une zone de déformation composée par deux zones de  
 1725 subductions de sens opposé : la zone Nouvelle-Zélande – Kermadec – Tonga et la  
 1726 zone Papouasie-Nouvelle-Guinée – Salomon – Vanuatu. Des bassins océaniques  
 1727 sont situés entre ces deux subductions. La figure ci-contre présente une coupe  
 1728 géologique du bassin Nord Fijien. D'après Ash et al. (1978) et Siméoni (2009 for  
 1729 a review).

1730

1731 Figure 1: A deformation area, constituted by two opposite subduction zones,  
 1732 New Zealand – Kermadec – Tonga and Papua-New-Guinea – Salomon – Vanuatu  
 1733 zones, characterize the actual convergence between Pacific and Australian

1734 plates. Back-arc basins are located between these two zones. The above figure  
1735 presents a geological section of the north Fijian basin. Modified after Ash et al.  
1736 (1978) and Siméoni (2009 for a review).  
1737



1737

3

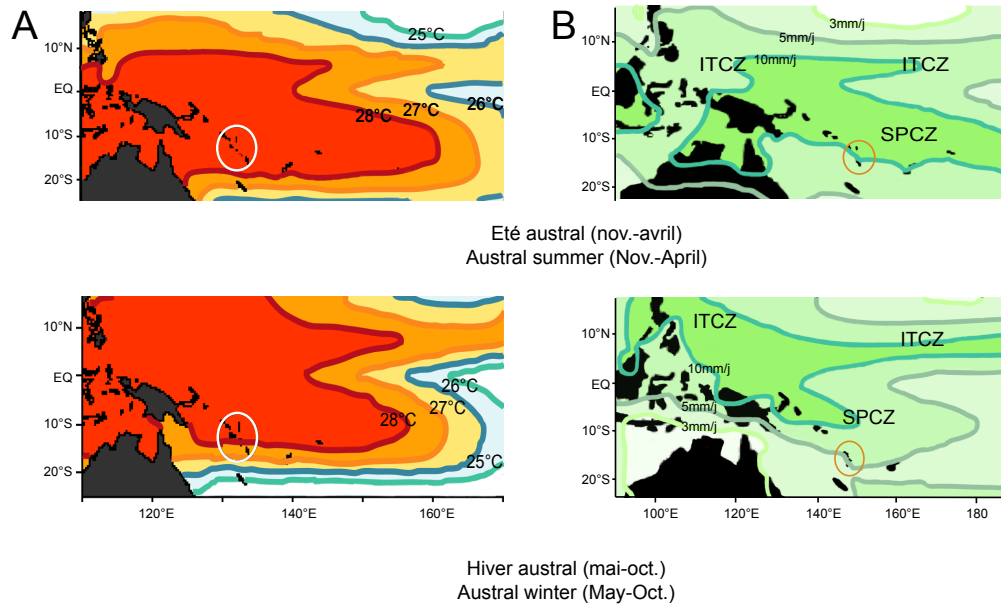
1738 Figure 2 : Carte géologique présentant les volcans aériens actifs majeurs et l'âge  
1739 des trois chaînes volcaniques de l'archipel du Vanuatu (voir l'annexe 2 pour la  
1740 correspondance âge période géologique). D'après Ash et al. (1978), Dugas et al.  
1741 (1976), Luyendyk et al. (1974) et Siméoni (2009 for a review).

1742

1743 Figure 2: The major aeriels active volcanoes, the three geological ridges of the  
1744 Vanuatu Archipelago and their ages of formation (see the appendix 2 for the age-  
1745 geological period relation). Modified after Ash et al. (1978), Dugas et al. (1976),  
1746 Luyendyk et al. (1974) and Siméoni (2009 for a review).

1747





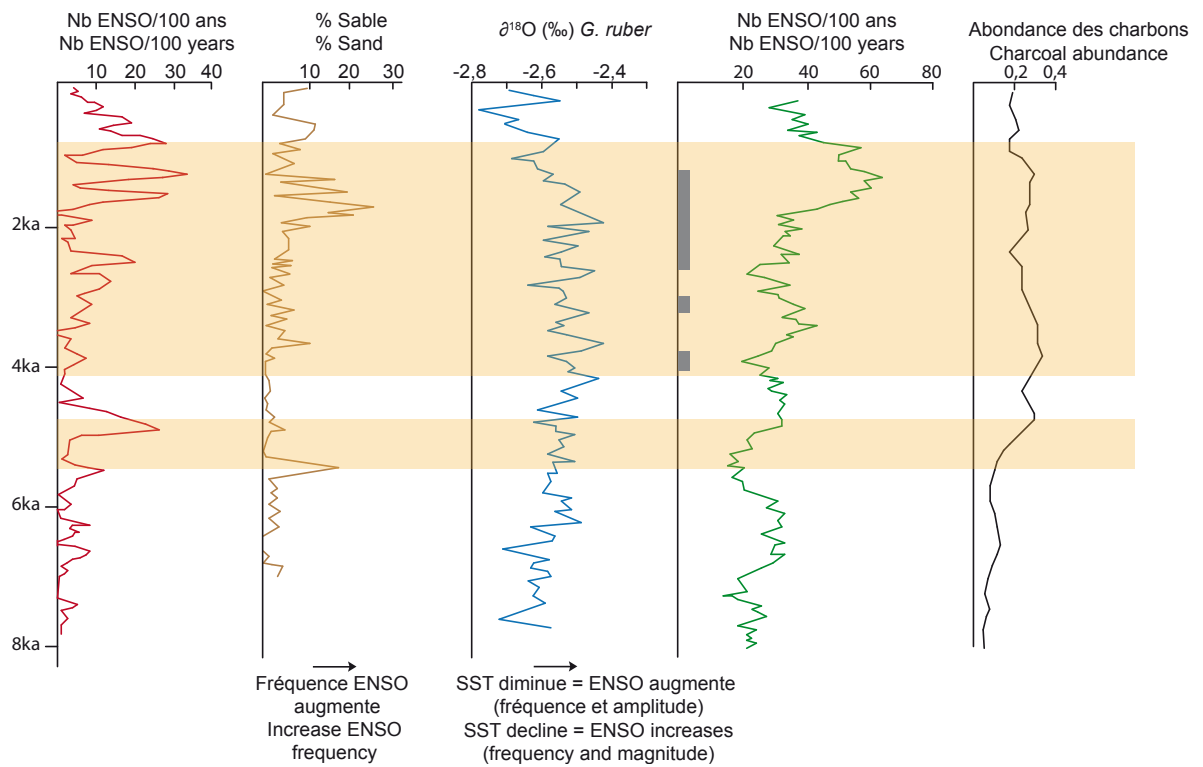
1747  
 1748

1749 Figure 3 : A) Localisation de la WPWP (isotherme 28°C) en été et en hiver  
 1750 austral. L'archipel du Vanuatu est entouré en blanc. La redistribution de  
 1751 l'énergie solaire entre l'été et l'hiver modifie le placement des alizés et donc les  
 1752 contractions/expansions de la WPWP. B) La convergence d'air chaud et humide  
 1753 des alizés de l'hémisphère nord et sud à l'origine de l'ITCZ entraîne de fortes  
 1754 précipitations dans cette zone du Pacifique. L'archipel du Vanuatu est entouré en  
 1755 orange. Les deux figures sont réalisées d'après Beucher (2010 for a review).

1756

1757 Figure 3: A) WPWP location (28°C isotherm) in austral summer and winter. A  
 1758 white circle highlights the Vanuatu archipelago. The solar energy redistribution  
 1759 between summer and winter modify the easterly trade wind position and the

1760 compression/expansion of the WPWP. B) The ITCZ and the strong rainfall in the  
1761 south-west Pacific are due to the convergence of the hot and humid air brought  
1762 by the trade winds from the north and south hemisphere. An orange circle  
1763 highlights the Vanuatu archipelago. Modified after Beucher (2010 for a review).  
1764



1764

1765

1766

1767 Figure 4 : Variation de l'amplitude et/ou de la fréquence d'ENSO au cours de  
 1768 l'Holocène moyen et supérieur, obtenue selon différents auteurs et proxies. Les  
 1769 deux rectangles orange signalent les périodes d'ENSO importantes observées  
 1770 dans tous les graphes. Auteurs et proxies donnés pour les graphes allant de la  
 1771 gauche vers la droite :

1772 Moy et al., 2002 : Étude sédimentologique, analyse des couleurs du sédiment,  
 1773 Équateur.

1774 Conroy et al., 2008 : Granulométrie associée à de la modélisation, Galápagos.

1775 Brijker et al., 2008 :  $\delta^{18}\text{O}$  et rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques,  
1776 Papouasie-Nouvelle- Guinée.

1777 Gagan et al., 2004 : Rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques, rapport  
1778 Sr/Ca et  $\delta^{18}\text{O}$  de coraux fossiles et charbons. Comparaison de ces proxies avec  
1779 des modèles. Papouasie-Nouvelle-Guinée, Indonésie, Australie, Philippines,  
1780 Vanuatu. Les rectangles gris correspondent aux périodes d'ENSO supérieures à  
1781 l'actuel.

1782 Haberle et al., 2001 : Comparaison entre charbons et données de la variabilité  
1783 d'ENSO, Papouasie-Nouvelle-Guinée.

1784

1785 Figure 4: Mid and late Holocene ENSO frequency and magnitude, according on  
1786 the authors and the proxies. The two orange rectangles correspond to important  
1787 ENSO periods observed in all the curves. Authors and proxies are given for each  
1788 curve from the left to the right:

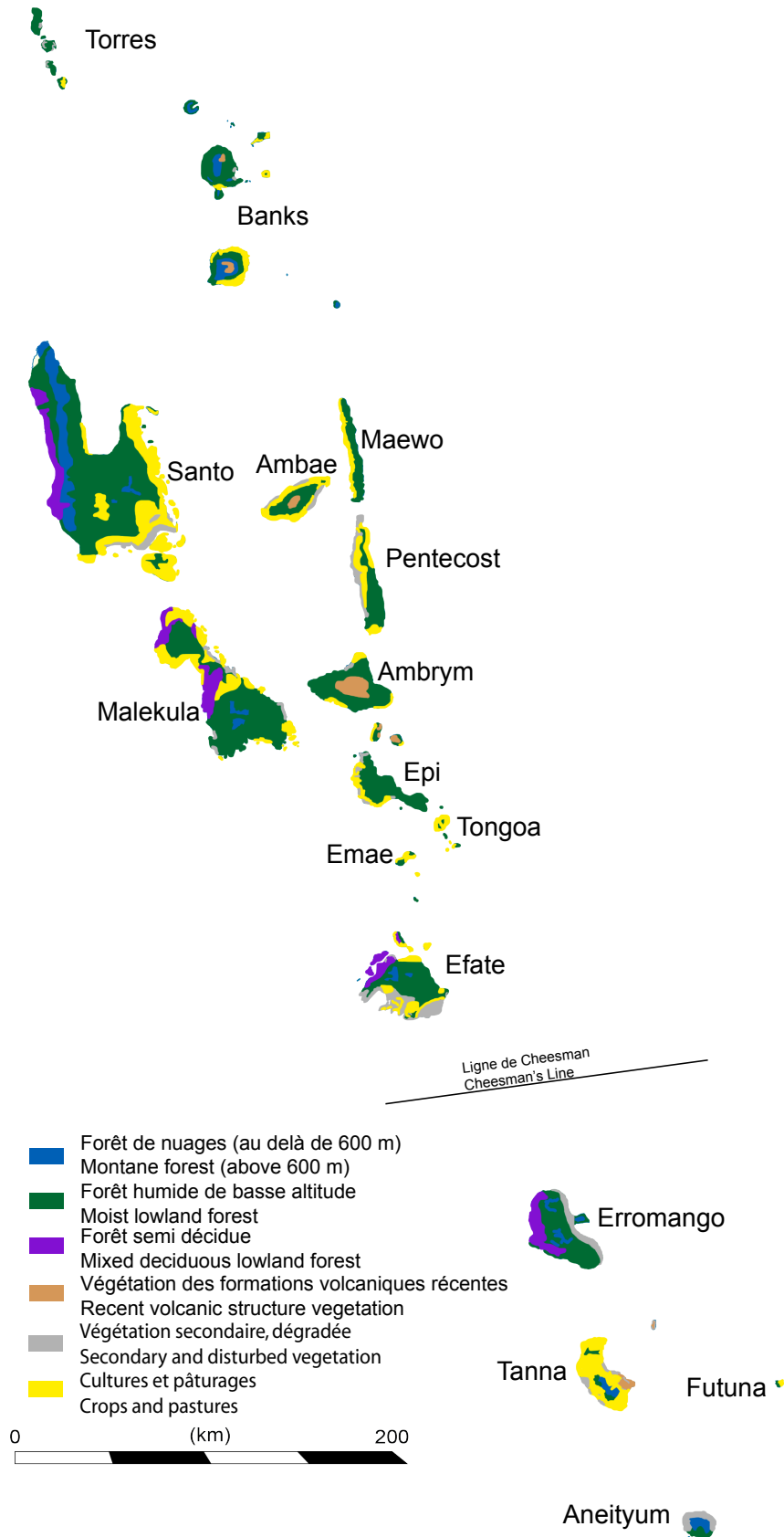
1789 Moy et al., 2002: Sedimentological and colour sediment analyses, Ecuador.

1790 Conroy et al., 2008: Grain size analysis and models, Galapagos.

1791 Brijker et al., 2008:  $\delta^{18}\text{O}$ , Mg/Ca from planctonic foraminifera, Papua-New-  
1792 Guinea.

1793 Gagan et al., 2004: Mg/Ca from planctonic foraminifera, Sr/Ca,  $\delta^{18}\text{O}$  from coral  
1794 and charcoal analysis. Theses proxies are compared with models. Papua-New-  
1795 Guinea, Indonesia, Australia, Philippines, Vanuatu. The grey rectangles  
1796 correspond to ENSO variability higher than actual.

1797 Haberle et al., 2001: Comparison between charcoal and ENSO variability data,  
1798 Papua-New-Guinea.



1800

1801

1802 Figure 5 : Carte de distribution de la végétation sur l'archipel du Vanuatu. Afin de

1803 ne pas surcharger la carte, les formations végétales locales comme la forêt

1804 littorale ou la forêt alluviale ne sont pas reportées. D'après Aubert (1972-1977),

1805 Siméoni, (2009 for a review) et Wheatley (1992).

1806

1807 Figure 5: Map showing the vegetation distribution in the Vanuatu archipelago. In

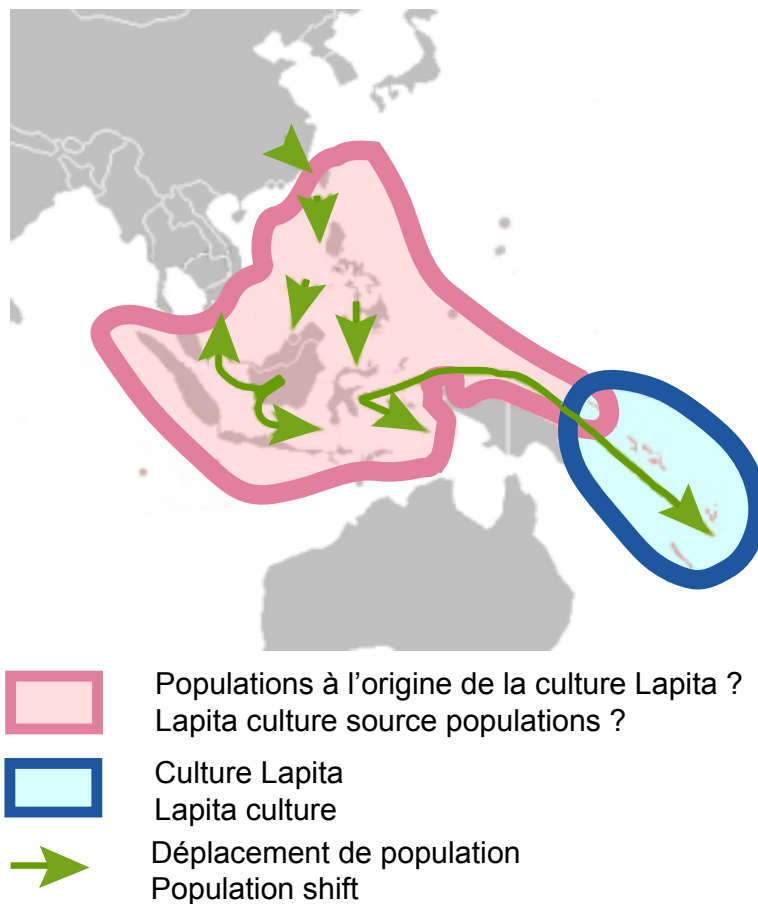
1808 order to make it easy to read, local vegetation formations as coastal forest or

1809 riparian forest are not reported on the map. Modified after Aubert (1972-1977),

1810 Siméoni, (2009 for a review) and Wheatley (1992).

1811

1811



1812

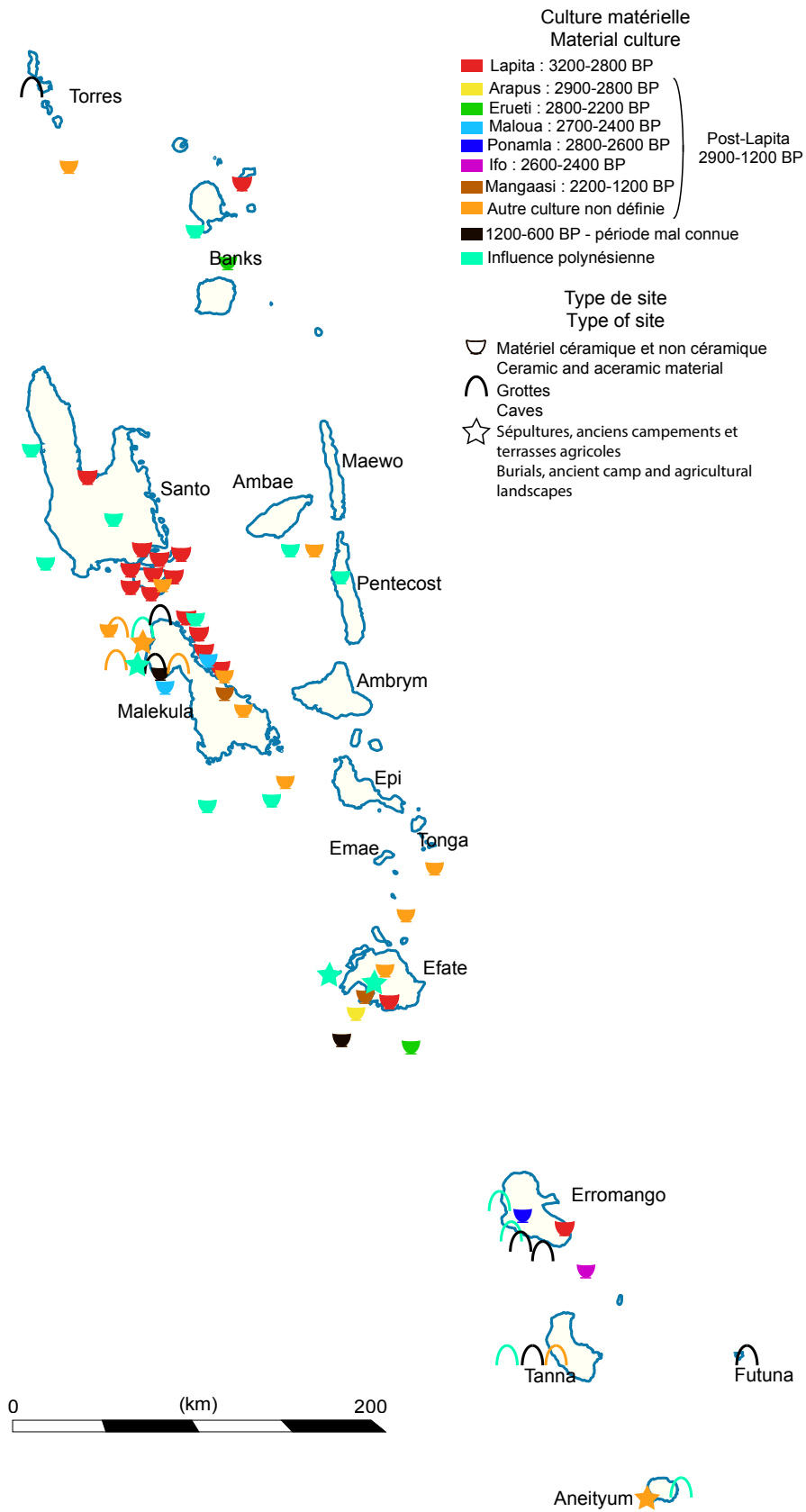
1813 Figure 6 : Origine possible de la culture Lapita et déplacement de populations. Il  
1814 est probable que les navigateurs Lapita quittant les îles Bismarck vers 3300 ans  
1815 BP soient les descendants des populations parties de Taïwan autour de 5000 ans  
1816 BP. La culture de ces derniers aurait évolué dans les îles Bismarck vers la culture  
1817 Lapita. D'après Bellwood (2005, 2011), Donohue et Denham (2012 for a review)  
1818 Pawley (2002, 2007) et Sand (2010 for a review).

1819

1820 Figure 6: Possible origin of the Lapita culture and population shifts. There may  
1821 be a filiations link between population who left Taiwan ca. 5000 yr BP and

1822 Lapita seafarers who left the Bismarck Islands ca. 3300 yr BP. The population's  
1823 culture from Taiwan could have been evolved into Lapita culture in the Bismarck  
1824 Islands. Modified after Bellwood (2005, 2011), Donohue et Denham (2012 for a  
1825 review) Pawley (2002, 2007) and Sand (2010 for a review).  
1826





1827

1828 Figure 7 : Sites archéologiques fouillés au Vanuatu, déterminés selon leur âge  
1829 (culture) et le type de site. Les sites non datés ne sont pas représentés sur la  
1830 carte. D'après Bedford (2006) et Siméoni (2009 for a review).

1831

1832 Figure 7: Type of site and age (culture) of the excavated archaeological sites in  
1833 Vanuatu. The undated sites are not presented on the map. Modified after  
1834 Bedford (2006) and Siméoni (2009 for a review).

1835

1835

1836 ANNEXES

1837

1838 Annexe 1 : les références citées, leur proxies et lieu d'étude  
1839 correspondant.

1840 Les références sont organisées selon les chapitres du papier et sont classées par  
1841 ordre alphabétique d'auteur. Si une même référence apparaît dans plusieurs  
1842 chapitres, elle est reportée dans le premier chapitre où elle est citée. Les auteurs  
1843 de références correspondant à des états des lieux (citation suivie de "for a  
1844 review") ne sont pas reportés ici.

1845

1846 Chapitre 2. Cadre géologique du Vanuatu

1847 Ash et al., 1978 : Datation K/Ar de dépôts volcaniques holocènes, Vanuatu.

1848 Bedford, 2007 : Datation  $^{14}\text{C}$  sur des coraux en contexte archéologique, Vanuatu.

1849 Cabioch et al., 2003 : Datation U/Th sur des coraux, Vanuatu.

1850 Dickinson, 2003 : Datation  $^{14}\text{C}$  sur des paléorécifs holocènes issus de plusieurs  
1851 îles, Micronésie, Polynésie.

1852 Dugas et al., 1976 : Datation K/Ar et profils sismiques de dépôts volcaniques  
1853 holocènes, Vanuatu.

1854 Firth et al., 2014 : Datation  $^{14}\text{C}$  sur des charbons de bois retrouvés dans les  
1855 sédiments intercalés entre les couches de téphras, géochimie des minéraux,  
1856 Vanuatu.

1857 Gao, 2006 : Analyse de la présence d'acide sulfurique dans les carottes de glaces,  
1858 Arctique et Antarctique.

1859 Lecolle et al., 1990 : Datation U/Th sur des coraux, Vanuatu.

- 1860 Luyendyck et al., 1974 : Datation K/Ar de dépôts volcaniques holocènes et  
1861 bathymétrie, Vanuatu.
- 1862 McCall et al., 1970 : Étude stratigraphique, structurale, géochimique et  
1863 pétrologique de dépôts volcaniques holocènes, Vanuatu.
- 1864 Monzier et al., 1994 : Étude stratigraphique de dépôts volcaniques holocènes,  
1865 Vanuatu.
- 1866 Neff et Veeh, 1997 : Datation U/Th sur des coraux, Vanuatu.
- 1867 Pang, 1993 : Comparaison entre  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces et étude historique, Arctique,  
1868 Antarctique, Vanuatu.
- 1869 Pinada et Galipaud, 1998 : Datation  $^{14}\text{C}$  sur des coraux en contexte archéologique,  
1870 Vanuatu (Malo).
- 1871 Witter et Self, 2006 : Étude stratigraphique de dépôts volcaniques holocènes,  
1872 Vanuatu.
- 1873 Robin et al., 1993 : Étude stratigraphique et structurale de dépôts volcaniques  
1874 holocènes, Vanuatu.
- 1875  
1876 Chapitre 3. Variabilité climatique au Vanuatu
- 1877 Les références citées dans les points 3.1. et 3.2. correspondent à des données  
1878 issues d'observations satellites actuelles de tout le Pacifique équatorial et  
1879 tropical ainsi que de modèles basés sur ces données.
- 1880 Adams et al., 2003 : Comparaison statistiques entre les données  
1881 paléoclimatiques et les dates des éruptions volcaniques, monde.
- 1882 Ammann et al., 2007 : modèles climatiques, tout le Pacifique.
- 1883 Anshari et al., 2000 : Étude palynologique, Indonésie.

- 1884 Backer et al., 2001 : Étude sédimentologique, Bolivie.
- 1885 Barr et al., 2014 : Étude sédimentologique (conductivité, reconstruction via les  
1886 fonctions de transferts) d'une carotte lacustre, Australie sud est.
- 1887 Braconnot et al., 2011 : combinaison de modèles couplés 3D, tout le Pacifique.
- 1888 Brijker et al., 2008 :  $\delta^{18}\text{O}$  et rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques,  
1889 Papouasie-Nouvelle- Guinée.
- 1890 Chazen et al., 2009 : analyse géochimique, de la productivité du phytoplancton,  
1891 de la silice biogénique et  $\delta^{15}\text{N}$  du sédiment marin, marge Pérou-Chili.
- 1892 Clement et al., 2000 : modèle couplé dont le système océan-atmosphère est  
1893 commandé par le forçage orbital, Pacifique tropical.
- 1894 Cobb et al., 2003 :  $\delta^{18}\text{O}$  de plusieurs coraux à résolution mensuelle, fenêtre de  
1895 temps de 100 ans sur les derniers 100 ans, atoll Palmyra (Pacifique tropical).
- 1896 Cole-Dai et al., 2013 : Analyse de la présence de sulfate dans les carottes de  
1897 glaces en lien avec les dates des éruptions volcaniques, Antarctique ouest et  
1898 Groenland.
- 1899 Conroy et al., 2008 : Granulométrie associée à de la modélisation, Galápagos.
- 1900 Corrège et al., 2000 : Rapports Sr/Ca et U/Ca de plusieurs coraux à résolution  
1901 annuelle sur environ 50 ans et autour de 4000 ans BP, Vanuatu.
- 1902 Denniston et al., 2013, 2014 :  $\delta^{18}\text{O}$  de plusieurs spéléothèmes, Australie nord.
- 1903 Donders et al., 2007 : Étude palynologique, Australie est.
- 1904 Donders et al., 2008 : compilation des données paléoENSO entre 6-5 ka et 4,5-3,5  
1905 ka dans tout le Pacifique (est et ouest), terrestres (pollen, charbons,  
1906 concentrations des éléments traces dans le sédiment,  $\delta^{13}\text{C}$ , malacologie,

1907 sédimentologie) et marin ( $\delta^{18}\text{O}$  foraminifères, corail, Sr/Ca corail, Mg/Ca  
1908 foraminifères).

1909 Fan et al., 2013 :  $\delta^{18}\text{O}$  et Mg/Ca de foraminifères, mer des Célèbes, Indonésie.

1910 Fleitmann et al., 2003 :  $\delta^{18}\text{O}$  d'un spéléothème, Oman sud.

1911 Forsyth et al., 2010 : Étude sédimentologique et granulométrique de plages  
1912 anciennes à résolution millénaire, Australie nord.

1913 Gagan et al., 2004 : Rapport Mg/Ca de foraminifères planctoniques, rapport  
1914 Sr/Ca et  $\delta^{18}\text{O}$  de coraux fossiles et charbons. Comparaison de ces proxies avec  
1915 des modèles. Papouasie-Nouvelle-Guinée, Indonésie, Australie, Philippines,  
1916 Vanuatu.

1917 Ganopolski et al., 1998 : modèles climatiques intégrant le forçage orbital, tout le  
1918 Pacifique.

1919 Gupta et al., 2003 : Étude sédimentologique et analyse de la présence du  
1920 foraminifère planctonique *Globigerina bulloides*, mer d'Arabie.

1921 Haberle et al., 2001 : Étude palynologique et comparaison charbons-données  
1922 variabilité d'ENSO, Papouasie-Nouvelle-Guinée.

1923 Haug et al., 2001 : Concentration en titane et fer de sédiments issus d'un lac  
1924 anoxique, Vénézuéla.

1925 Hu et al., 2008 :  $\delta^{18}\text{O}$  d'une stalagmite, Chine.

1926 Jones et al., 2006 :  $\delta^{18}\text{O}$  à haute résolution d'une carotte lacustre, Turquie.

1927 Khider et al., 2011 :  $\delta^{18}\text{O}$  foraminifères planctoniques à résolution mensuelle,  
1928 Bornéo.

1929 Loubere et al., 2013 :  $\delta^{18}\text{O}$  de coquilles (paléoSST) et comparaison entre  $\delta^{18}\text{O}$  de  
1930 l'eau de mer actuel (SST théorique) et SST actuel mesuré (pour déterminer des  
1931 potentiels biais), Pérou.

1932 Mann et al., 2009 : comparaison modèles – proxies (carotte de glaces, cernes  
1933 d'arbres, coraux, spéléothèmes), tout le Pacifique.

1934 Matthey et al., 2011 :  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  d'un spéléothème, Fiji.

1935 McGregor et Gagan, 2004 :  $\delta^{18}\text{O}$  de plusieurs coraux à résolution annuelle,  
1936 Papouasie-Nouvelle-Guinée.

1937 McRobie et al., 2015 : modèles statistiques pour simuler les interactions entre  
1938 les différentes données paléoclimatiques issues de différents proxies, nord  
1939 Australie.

1940 Mohtadia et al., 2007 : Étude sédimentologique,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , analyse micro-faune  
1941 d'une carotte lacustre, Chili sud.

1942 Moy et al., 2002 : Étude sédimentologique, analyse des couleurs du sédiment,  
1943 Équateur.

1944 Nan et al., 2014 :  $\delta^{13}\text{C}$ , T.O.C. et analyse granulométrique, Chine sud.

1945 Nott et Hayne, 2001 : Comparaison modèles-données (présence de coraux,  
1946 coquilles cassés dans les sédiments alluviaux grossiers), Australie (grande  
1947 barrière de corail).

1948 Nott et al., 2007 :  $\delta^{18}\text{O}$  d'un spéléothème à résolution annuelle, Australie nord.

1949 Nott et al., 2009 : Étude sédimentologique et granulométrique de plages  
1950 anciennes à résolution millénaire, Australie nord.

1951 Oppo et al., 2009 :  $\delta^{18}\text{O}$  et rapport Mg/Ca sur les foraminifères *Globigerinoides*  
1952 *ruber* à résolution annuelle, Chine sud et Bornéo.

- 1953 Partin et al., 2007 :  $\delta^{18}\text{O}$  de trois spéléothèmes, Bornéo.
- 1954 Rein et al., 2004 : Étude sédimentologique (composition lithique, flux de  
1955 sédiment), Pérou.
- 1956 Renseen et al., 2005 : modèle climatique à hautes latitudes, hémisphère sud.
- 1957 Rodbell et al., 1999 : Étude sédimentologique d'alluvions Équateur
- 1958 Sandweiss et al., 2001 : Comparaison des données archéologiques et  
1959 paléoclimatiques, Pérou.
- 1960 Servant et Servant-Vildary, 2003 : stratigraphie et analyse de diatomées de  
1961 carottes palustres, Bolivie.
- 1962 Steinke et al., 2014 : analyse sédimentologique à haute résolution depuis 6000  
1963 ans, en mer proche de l'île Sumba, Indonésie.
- 1964 Sun et al., 2005 :  $\delta^{18}\text{O}$  corail autour de 4400 ans BP, fenêtre de temps de 54 ans,  
1965 sud de la mer de Chine.
- 1966 Thompson et al., 2000 :  $\delta^{18}\text{O}$  de glaces de montagne (6000 m), Pérou.
- 1967 Thudhope et al., 2001 :  $\delta^{18}\text{O}$  de plusieurs coraux à résolution annuelle pour trois  
1968 périodes différentes, Papouasie-Nouvelle-Guinée.
- 1969 Vargas et al., 2006 : chronostratigraphie (datation  $^{14}\text{C}$  et étude de la stratigraphie  
1970 des terrasses marines) des flux de débris et comparaison avec d'autres  
1971 enregistrements paléoclimatiques, Pérou et Chili.
- 1972 Wang et al., 2005 :  $\delta^{18}\text{O}$  d'un spéléothème, Chine sud.
- 1973 Yann et al., 2011 : Combinaison de proxies liés à la précipitation, tout le Pacifique  
1974 tropical.
- 1975 Zhang et al., 2014 : étude de la concentration et du  $\delta\text{D}$  des lipides produit par  
1976 l'algue verte *Botryococcus braunii* Junco Lake, îles Galápagos.  
1977



- 1978 Chapitre 4. Biodiversité floristique et faunistique du Vanuatu
- 1979 La majorité des références citées dans ce chapitre correspondent à des atlas, des
- 1980 guides de déterminations ou à des recensements de la biodiversité suite à un
- 1981 endroit particulier.
- 1982 Bedford, 2006 : Comparaison des types d'artéfacts non céramiques retrouvés sur
- 1983 les sites archéologiques, Vanuatu.
- 1984 Morishita et Heki, 2008 : données climatiques satellites et simulations, Vanuatu.
- 1985
- 1986 Chapitre 5. Histoire de l'Homme
- 1987 Allen et White, 1980, 1989 : Analyses des différents artéfacts céramiques et non
- 1988 céramiques, îles Bismarck.
- 1989 Allen, 2007 : Compilation de données archéologiques et ethnologiques, Fiji et
- 1990 Polynésie.
- 1991 Anderson, 2000 : Analyse des artéfacts liés à la culture maritime, zone Indo-
- 1992 Pacifique
- 1993 Anderson, 2003 : Modélisation des possibles patterns de migrations Lapita, toute
- 1994 la zone Lapita.
- 1995 Anderson et al., 2006 : Modélisation des possibles migrations selon le climat, de
- 1996 la Papouasie-Nouvelle-Guinée au Vanuatu.
- 1997 Bedford, 2006 : Comparaison des artéfacts céramiques et acéramiques retrouvés
- 1998 dans les sites archéologiques, tout le Vanuatu.
- 1999 Bedford, 2009 : Compilation des analyses de tessons de poterie (formes et
- 2000 motifs), Vanuatu central.
- 2001 Bedford et Spriggs, 2007 : Rapport de fouilles archéologiques, Vanuatu nord.

2002 Bedford et al., 2007 : Analyses de tessons de poterie (formes et motifs) du  
2003 cimetière de Teouma, Vanuatu.

2004 Bedford et al., 2010 : Résultat de la fouille du cimetière de Teouma, Vanuatu.

2005 Bellwood, 2005 : Compilation des données archéologiques, linguistiques et  
2006 anthropologiques, toute la zone Lapita.

2007 Bellwood, 2011 : Compilation des données archéologiques, linguistiques et de  
2008 techniques, de Taïwan à la Papouasie-Nouvelle-Guinée.

2009 Bentley et al., 2007 : Sr/Ca,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  et Ba/Sr, émail des dents des individus du  
2010 cimetière de Teouma, Vanuatu.

2011 Buckley et al., 2014 : Étude de la structure des ossements humains du cimetière  
2012 de Teouma, Vanuatu.

2013 Burley et Connaughton, 2007 : Rapport de fouilles archéologiques, Tonga.

2014 Chiu, 2005 : Analyses de tessons de poterie (formes et motifs) de Koné,  
2015 Nouvelle-Calédonie.

2016 Chiu, 2007 : Analyses de tessons de poterie (formes et motifs) de Koné,  
2017 Nenumbo, Gnamanie-Reefs et Nanggu, Nouvelle-Calédonie et Santa Cruz.

2018 Clark et Murray, 2006 : Analyses de tessons de poterie (formes et motifs), Fiji  
2019 est.

2020 Coiffier, 2009 : Histoire de la découverte et de la fouille des sites archéologiques  
2021 liés à Roy Mata, Vanuatu (Efate).

2022 David et al., 2011 : Rapport de fouilles archéologiques, Papouasie-Nouvelle-  
2023 Guinée.

2024 Dickinson, 2006 : Compilation des données sédimentologiques, pétrologiques,  
2025 géochimiques et archéologiques, toute l'Océanie.

2026 Fitzpatrick et Callaghan, 2013 : Modélisation des possibles migrations selon le  
2027 climat, de la Papouasie-Nouvelle-Guinée aux Mariannes.

2028 Galipaud et Kelly, 2007 : Datation  $^{14}\text{C}$  et comparaison des éclats d'obsidiennes  
2029 retrouvés sur les différents sites Lapita, Papouasie-Nouvelle-Guinée.

2030 Galipaud et al., 2014 : Caractérisation d'éclats d'obsidiennes par spectrométrie  
2031 (analyse d'une trentaine d'isotopes stables) issues du site de Makué, Vanuatu.

2032 Garanger, 1972 : Études du matériel céramique, lithique, coquilles, parures,  
2033 sépultures, et études ethnologiques, Vanuatu.

2034 Garling, 2007 : Thèse, analyse des tessons de poterie par MEB, d'éclats  
2035 d'obsidiennes PIXE-PIGME et d'ocre par diffractions X, sites archéologiques de la  
2036 Nouvelle-Irlande.

2037 Gosden, 1989 : Compilation des analyses des différents artefacts céramiques et  
2038 non céramiques, îles Bismarck.

2039 Green, 2000, 2003 : Compilation des analyses de tessons de poterie (formes et  
2040 motifs), toute la zone Lapita.

2041 Grifford et Schulter, 1952 : Rapport de fouilles archéologiques, Nouvelle-  
2042 Calédonie.

2043 Horrocks et Bedford, 2005 : Analyse des phytolithes, de l'amidon et des pollen  
2044 dans un sol archéologique Lapita, Vanuatu (Malekula).

2045 Kinaston et al., 2014a : Analyse des isotopes stables  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  sur des  
2046 ossements humains du site d'Uripiv, Vanuatu.

2047 Kinaston et al., 2014b : Analyse des isotopes stables  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  sur des  
2048 ossements humains du cimetière de Téouma, Vanuatu.

2049 Kumar et al., 2004 : Rapport de fouilles archéologiques, Fiji.

2050 Lynch, 2004 : Analyse linguistique sur les îles d’Efate et Erromango, Vanuatu.

2051 Martin et Steadman, 1999 : Compilations des données archéozoologiques de tout  
2052 le Pacifique tropical.

2053 McNiven et al., 2011 : Rapport de fouilles archéologiques, Papouasie-Nouvelle-  
2054 Guinée.

2055 Pawley, 2002, 2007 : Analyse linguistique, toute la zone Lapita.

2056 Petchey, 2001 : Datation <sup>14</sup>C de la faune (coquille, tortue, corail) issue du site de  
2057 Mulifanua, Samoa.

2058 Petchey et al., 2014 : Datation <sup>14</sup>C des ossements du cimetière de Teouma,  
2059 Vanuatu.

2060 Reepmayer et Clark, 2010 : Analyses par spectrométrie d’éclats d’obsidiennes  
2061 des sites archéologiques Tongatapu, Tafahi et Lakeba, Tonga et Fiji.

2062 Sand et al., 1998 : Compilation des données des sites Lapita en Nouvelle-  
2063 Calédonie.

2064 Scott et al., 2010 : Étude de la structure des ossements humains brûlés du  
2065 cimetière de Teouma, Vanuatu.

2066 Sheppard et Walter, 2006 : Compilations des données archéologiques,  
2067 linguistiques, palynologique et biologique (ADN), îles Salomon.

2068 Spriggs, 2004 : Compilation des analyses de tessons de poterie (formes et  
2069 motifs), Mélanésie.

2070 Sulter et al., 2002 : : Rapport de fouilles archéologiques, Vanuatu sud.

2071 Summerhayes, 2000 : Analyses de tessons de poterie (formes et motifs) et  
2072 d’éclats d’obsidiennes (analyse d’une trentaine d’isotopes stables par  
2073 spectrométrie), de la Papouasie-Nouvelle-Guinée aux Samoa.

- 2074 Terrel, 2004 : Étude linguistique, Pacifique sud ouest.
- 2075 Torrence, 2002 : Rapport de fouilles archéologiques, Papouasie-Nouvelle-  
2076 Guinée.
- 2077 Valentin et al., 2010 :  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  d'ossements humains, *S. scrofa*, *R. exculens* et *N.*  
2078 *macdonaldi* du cimetière de Teouma, Vanuatu.
- 2079 Valentin et al., 2014 : Comparaison du  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  d'ossements humains Lapita,  
2080 post-Lapita de Teouma et de données paléoenvironnementales, Vanuatu.
- 2081 Ward, 1979 : Thèse étude du matériel céramique et non céramique (artéfacts en  
2082 os, coquille, basalte), sites archéologiques des îles Banks.
- 2083  
2084 Chapitre 6. Interrelations entre ces environnements à l'Holocène
- 2085 Anderson, 2002 : Compilation des données faune, flore, archéologiques  
2086 (migration) sur les trois derniers millénaires, Océanie Lointaine.
- 2087 Anderson, 2009 : Compilation des données archéologiques (archéozoologie,  
2088 génétique, linguistiques) sur les animaux introduits et ceux disparus après  
2089 l'arrivée des populations Lapita, tout le Pacifique.
- 2090 Biagoni et al., 2015 : Comparaison entre les données palynologiques, la  
2091 fréquence des feux, les paléoprécipitations et les reconstructions climatiques  
2092 régionales, Indonésie.
- 2093 Carson, 2013 : Compilation des données archéologiques, sédimentologiques,  
2094 palynologiques et faunistiques (coquilles marines et vertébrés terrestres),  
2095 Nouvelle-Calédonie.

2096 Crowley, 2000 : Comparaison modèles-données (température atmosphérique,  
2097 éruptions volcaniques, variabilité solaire, concentration en aérosols  
2098 troposphériques) sur les 1000 dernières années, hémisphère nord.  
2099 Fall, 2005 : Étude palynologique, Tonga.  
2100 Field et Lape, 2011 : Comparaison des données paléoclimatiques (SST, SSS) et  
2101 données archéologiques, tout le Pacifique équatorial.  
2102 Frogner Kockum et al., 2006 : simulation de l'impact des retombées volcaniques  
2103 sur la biosphère.  
2104 Giggenbach, 1996 : Géochimie des gaz volcaniques, hémisphère sud.  
2105 Hoffman, 2007 : Compilation des données géologiques, linguistiques,  
2106 archéologiques et ethnologiques, Vanuatu (Epi).  
2107 Hope et al., 1999 : Compilation des données palynologiques, Vanuatu, Fiji et  
2108 Nouvelle-Calédonie.  
2109 Horrocks et al., 2009 : Étude de phytolithes de *Musa* en contexte archéologique,  
2110 Vanuatu (Malekula et Epi).  
2111 Masse et al., 2006 : Datation <sup>14</sup>C, compilation de données palynologiques et  
2112 archéozoologiques, Micronésie.  
2113 Prebble et Wilmshurt, 2008 : Étude palynologique et étude tracéologique sur des  
2114 graines mangées par des rats, Îles Australes et Nouvelle-Zélande.  
2115 Stevenson, 2004 : Étude palynologique et des charbons de bois d'une carotte  
2116 lacustre, Nouvelle-Calédonie  
2117 Storey et al., 2008 : Compilations des données de présence/absence du poulet  
2118 (*Gallus gallus*) dans les sites archéologiques et naturels. Tentative de corrélation

2119 de ces données avec la taphonomie, la présence/absence d'autres animaux,  
2120 l'accès aux ressources et l'influence humaine. Tout le Pacifique.  
2121 Wirrmann et al., 2011a : Étude sédimentologique, palynologique et de la micro-  
2122 faune d'une carotte lacustre, Vanuatu.  
2123 Wirrmann et al., 2011b : Étude sédimentologique, palynologique et des charbons  
2124 de bois d'une carotte lacustre, Nouvelle-Calédonie.  
2125

2125 Annexe 2 : Charte chronostratigraphique internationale du Tertiaire  
 2126 Version 2014/2.

2127 D'après l'International Commission on Stratigraphy

2128

## INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

| Ère/Era           |            | Période/System |           | Âges/Stage   | Âge numérique (Ma)<br>Numerical age (Ma) |
|-------------------|------------|----------------|-----------|--------------|------------------------------------------|
|                   |            | Époque/Series  |           |              |                                          |
| <b>Cénozoïque</b> | Quaternary | Holocène       |           | Supérieur    | 0,0117                                   |
|                   |            |                |           | Moyen        | 0,126                                    |
|                   |            |                |           |              | 0,781                                    |
|                   |            | Pléistocène    |           | Calabrien    | 1,80                                     |
|                   |            |                |           | Gélasien     | 2,58                                     |
|                   | Néogène    | Pliocène       |           | Plaisancien  | 3,60                                     |
|                   |            |                |           | Zancléen     | 5,333                                    |
|                   |            | Miocène        |           | Messinien    | 7,246                                    |
|                   |            |                |           | Tortinien    | 11,62                                    |
|                   |            |                |           | Serravallien | 13,82                                    |
|                   |            |                |           | Langhien     | 15,97                                    |
|                   |            |                |           | Burdigalien  | 20,44                                    |
|                   | Paléogène  | Oligocène      |           | Aquitanién   | 23,03                                    |
|                   |            |                |           | Chattien     | 28,1                                     |
|                   |            | Éocène         |           | Rupélien     | 33,9                                     |
|                   |            |                |           | Priabonien   | 38,0                                     |
|                   |            |                |           | Bartonien    | 41,3                                     |
|                   |            |                |           | Lutécien     | 47,8                                     |
|                   |            |                |           | Yprésien     | 56,0                                     |
|                   |            |                |           | Thanétien    | 59,2                                     |
| Paleocène         |            |                | Sélandien | 61,6         |                                          |
|                   |            |                | Danien    | 66,0         |                                          |







ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

## Comptes Rendus Palevol

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



General Palaeontology, Systematics and Evolution (Palaeobotany)

### High-resolution pollen record from Efate Island, central Vanuatu: Highlighting climatic and human influences on Late Holocene vegetation dynamics



*Pollinique à haute résolution de l'île d'Efate Vanuatu central : mise en évidence des influences climatique et humaine sur la dynamique de végétation de l'Holocène récent*

Claire Combettes<sup>a,b,\*</sup>, Anne-Marie Sémah<sup>b,a</sup>, Denis Wirmann<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Département de Préhistoire (UMR7194)–MNHN, Institut de Paléontologie Humaine, 1, rue René Panhard, 75013 Paris, France

<sup>b</sup> IRD-Sorbonne Universités (UPMC, Univ Paris 06)–CNRS–MNHN, LOCEAN Lab. UMR 7159, IRD France-Nord, 32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 10 July 2014

Accepted after revision 20 February 2015

Available online 9 June 2015

Presented by W. Dimichele

##### Keywords:

Pollen

Vegetation

Climate

Human settlement

Vanuatu

Holocene

##### Mots clés :

Pollen

Végétation

Peuplement humain

Climat

Vanuatu

Holocène

#### ABSTRACT

Climate changes, sea-level variations, volcanism and human activity have influenced the environment of the southwest Pacific Islands during the Holocene. The high-resolution palynological analysis presented here concerns two specific levels (main lithological changes) of a well-dated Holocene core, Tfer06, collected from Emaotfer Swamp, Efate Island (Vanuatu). Our aim is to understand the role of climatic variability and human activities in shaping vegetation during these changes. Between 3790–3600 cal yr BP, the development of vegetation marked by disturbance is a marker of an increase in sustained El Niño events, also observed in many Asian-West Pacific areas. Between 1500–900 cal yr BP, the increase in introduced taxa and in microcharcoal particles is interpreted as human impact. In a forthcoming paper, the ongoing high-resolution palynological analysis of the whole core will be compared and integrated into regional palaeoecological data.

© 2015 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

#### R É S U M É

Les changements climatiques, les variations du niveau de la mer, le volcanisme et les activités humaines ont influencé l'environnement du Sud-Ouest Pacifique pendant l'Holocène. L'analyse palynologique à haute résolution proposée dans ce papier se focalise sur deux niveaux spécifiques (changements lithologiques) d'une carotte bien datée, Tfer06, prélevée dans le marais d'Émaotfer, sur l'île d'Efate (Vanuatu). Le but est de comprendre le rôle des variations climatiques et des activités humaines sur le développement de la végétation durant ces changements. Entre 3750–3600 ans cal BP, l'essor d'une végétation secondaire

\* Corresponding author at: Département de Préhistoire (UMR7194)–MNHN, Institut de Paléontologie Humaine, 1, rue René Panhard, 75013, Paris, France.  
E-mail address: [claire.combettes@edu.mnhn.fr](mailto:claire.combettes@edu.mnhn.fr) (C. Combettes).

est interprété comme un marqueur d'une intensification des phénomènes El Niño, observée aussi dans la région Asie-Pacifique. Entre 1500–990 ans cal BP, l'augmentation des taxons introduits et des microcharbons est probablement un témoin des activités humaines. Dans un prochain article, l'analyse palynologique de la carotte complète sera comparée aux données paléocéologiques de la région.

© 2015 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## 1. Introduction

During the Late Holocene, environmental conditions have principally been impacted by abrupt climate changes, volcanic eruptions, tectonic uplift and/or human activities (Goudie, 2013; Wanner et al., 2008). Palynology has the potential to be an effective tool to understand how the vegetation responds to these events. Although the majority of palaeoenvironmental studies principally concerns Europe and North America (Clement et al., 2001; Mackay et al., 2003), the amount of palaeoecological research across the Pacific has continuously increased in the last decade (Cabioch et al., 2008; Donders et al., 2007; Haberle et al., 2012; Hope et al., 2009; Rowe et al., 2013; Stevenson and Hope, 2005). The first humans (Lapita culture) settled Remote Oceania (Southeast of the Solomon Islands archipelago), ca. 3000 cal yr BP (Petchey et al., 2014; Sand, 2010, for a review). These human groups have probably been affected by climate changes (Anderson et al., 2013; Brázdil et al., 2005; Field and Lape, 2010), but have also certainly impacted the natural environment of pristine islands in many ways (Anderson, 2009; Fall, 2005; Horrocks et al., 2009; Prebble and Wilmshurst, 2008; Stevenson, 2004; Summerhayes et al., 2009).

Most research in the Vanuatu region have focused on submarine geology (Lecolle et al., 1990; Pineda and Galipaud, 1998; Woodroffea and Horton, 2005), volcanology (Ash et al., 1978; Robin et al., 1993; Witter and Self, 2007), archaeology (Bedford et al., 2006; Galipaud et al., 2014; Valentin et al., 2010) and palaeoclimatic changes based on models and marine data (Asami et al., 2013; Corrège et al., 2000; Donders et al., 2008). However, the relation between climate, vegetation and human activity still remains unclear.

Wirrmann et al. (2011a) conducted one of the first terrestrial multi-proxy analyses of mid-Holocene environmental changes in Vanuatu, based on the study of the core Tfer06 retrieved from Emaotfer Swamp (Efate Island, central Vanuatu). The results indicate environmental changes, correlated with climatic variations over the last 6670 cal yr BP. Three main vegetation groups were observed, based on the preliminary pollen analysis. In order to understand the pattern of vegetation change, our high-resolution palynological study covers specific sections of the core Tfer06, at ca. 3790–3600 and 1500–900 cal yr BP, respectively. These sections, characterized by proxies variations (lithology, microfauna-flora) indicate high environmental transformations. In this paper, our aim is to distinguish the role of climatic changes from human activities in shaping vegetation during these particular periods, to further comparing our data with results obtained across the Southwest Pacific area.

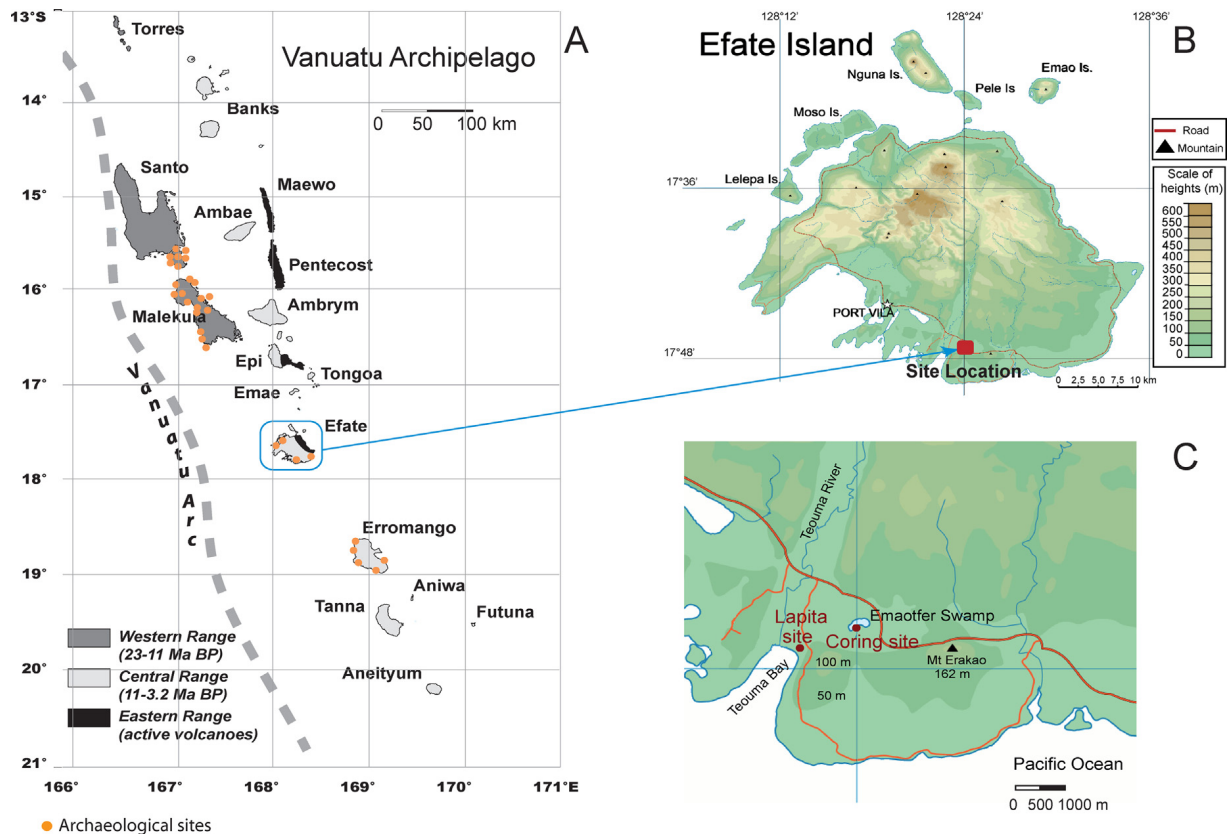
## 2. Natural and archaeological settings

### 2.1. Natural settings

The Vanuatu Archipelago is located between the Australian and Pacific tectonic plates, at the eastern margin of the Vanuatu Arc (Fig. 1). It comprises both subaerial and submarine volcanoes (Ash et al., 1978), some of which are still active. These islands consist of lava formed by basalt volcanoes dating from Late Miocene to Holocene. Efate Island, located in the central part of Vanuatu, consists mainly of volcanic rocks levelled by erosion, and limestone terraces issued from tectonic uplifts. Emaotfer Swamp, located on the southern coast of Efate, lies on a Pleistocene limestone terrace (Ash et al., 1967–1970). It is close to the Teouma Graben, on the left side of Teouma River. The water depth is currently less than 1 m throughout the swamp. During the wettest season (December through April), the water level rises and decreases during the drier season (July through September).

The oceanic context and the oceanic-atmosphere coupling (West Pacific Warm Pool, WPWP and South Pacific Convergence Zone, SPCZ) mainly influence the subtropical climate of the archipelago (Vincent, 1994). The location and the magnitude variability of WPWP and SPCZ control the alternation of wet (summer) and relatively dry (winter) season, the wet season being often marked by strong cyclones. Annual rainfall on Efate Island varies, on average, between 2400 mm on the western coast and 3000 mm on the eastern coast (Cillaurren et al., 2001). The El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Wyrski, 1975), the primary cause of long-term climate variability in the western Pacific (Kilbourne et al., 2004; Moy et al., 2002), influences rainfall and sea surface temperatures (SSTs). The wind-driven ocean currents move warm water in the ocean, eastward during the warm phase (El Niño) and westward during the cool phase (La Niña). The strengthening of El Niño-like conditions causes the northward shift of the SPCZ, consequently Vanuatu becomes relatively drier; conversely, under La Niña-like conditions, the SPCZ is shifted southward and precipitation increases on Vanuatu. Palaeo-ENSO records throughout the tropical Pacific region identify the onset of modern ENSO periodicities after 5000 yr BP, with abrupt increases in ENSO magnitude around 3700 and 3300 yr BP (Brijker et al., 2007; Donders et al., 2007, 2008; Gagan et al., 2004; Griffiths et al., 2010).

During Late Quaternary, sea-level changes have occurred in relation to tectonic uplifts and eustatic variations. In Vanuatu, the sea-level has risen by 120 m since the Last Glacial Maximum to 6 ka due to eustatic variations, with a sudden acceleration after 11.3 ka (Cabioch et al., 2003). Important forearc tectonic effects vary with



**Fig. 1.** (Color online.) A. The Vanuatu Archipelago with the three geological ridges, their ages of formation (after Ash et al., 1978; Witter and Self, 2007), and the locations of archaeological sites (after Bedford et al., 2006). B. Location of Emaotfer Swamp (red rectangle) on the left bank of Teouma River (after Hema Maps Vanuatu, 3rd edition, 1999). C. Topographic sketch of the area close to the swamp and location of the archaeological and coring sites (after Hema Maps Vanuatu, 3rd edition, 1999).

**Fig. 1.** (Couleur en ligne.) A. L'archipel du Vanuatu, avec ses trois chaînes géologiques, leur âge de formation (d'après Ash et al., 1978; Witter et Self, 2007), et les positions des sites archéologiques (d'après Bedford et al., 2006). B. Localisation du marais d'Emaotfer (rectangle rouge) sur la rive droite de la rivière Teouma (d'après Hema Maps Vanuatu, 3<sup>e</sup> édition, 1999). C. Carte topographique de la zone autour du marais, et localisation du site archéologique et du site de carottage (d'après Hema Maps Vanuatu, 3<sup>e</sup> édition, 1999).

geographical position (Lecolle et al., 1990; Pineda and Galipaud, 1998): in north Vanuatu, high uplift rates have been recorded (3.2 mm/yr on Malo), while they are weaker in central Vanuatu. Estimations of the last interglacial uplift rate of 0.2–0.6 mm/yr, and 0.8–1 mm/yr are reported on the northeast and southwest coast of Efate, respectively (Lecolle et al., 1990; Pineda and Galipaud, 1998).

This archipelago is quite young, and its flora is principally derived from Southeast Asia by winds, sea and/or animals (Schmid, 1987).

Field trips conducted in September 2005 and October 2013 enabled us to characterize the present-day vegetation around the Emaotfer Swamp. Its shores consist of wooded areas, rich in creepers, and dominated by *Barringtonia edulis*, *Pandanus tectorius* and *Hibiscus tiliaceus*. Cyperaceae, Poaceae, Nymphaeaceae and ferns cover the flooded zones of the swamp. The surrounding plateau is an anthropogenic savannah, composed principally of Urticaceae, Moraceae, Burseraceae and Flacourtiaceae, as a result of cattle grazing.

## 2.2. Archaeological settings

As on other south Pacific archipelagos, Vanuatu abounds in archaeological sites (Bedford, 2009; Galipaud, 2004;

Garanger, 1972; Shutler et al., 2002; Valentin et al., 2011). Bearers of the Lapita culture began to settle Efate Island around 3000 cal yr BP, and one archaeological Lapita site have been uncovered on Efate, on the western side of Emaotfer Swamp (Bedford et al., 2006): nearly 70 burials features and remains of just over 100 individuals, some accompanied with pots, as well as a contemporary midden constitute the Teouma cemetery. Burial use of the site continued for up to 200–300 years, beginning ca. 3100–2900 cal yr BP or even slightly later ca. 2880–2800 cal yr BP (Petchey et al., 2014). The Teouma cemetery is an outstanding Lapita archaeological site due to the significant number of burials, which represents an early phase of Lapita migration into Remote Oceania (Bedford et al., 2009). The settlement expanded across the cemetery area during the late Lapita-Erueti transitional period (2700–2300 cal yr BP). But there are no traces of human occupation after 2300 cal yr BP, until the development of a coconut plantation, about one century ago.

Languages, material cultures and social practices remained similar during Lapita period, whereas the post-Lapita period was characterized by varied cultures, depending on time and geographic positions (Bedford, 2009). Subsistence behaviour also changed in the

Southwest Pacific Islands: Lapita people consumed a large range of food items, taken from the reef, inshore and terrestrial environment, while post-Lapita people favoured lower trophic level terrestrial resources, suggesting the intensification of horticulture (Field et al., 2009; Kinaston et al., 2013, 2014; Valentin et al., 2014). However, to stimulate tuber growth of introduced plants (taro and yam), the settlers consistently cut their flowers: hence, the paucity of these introduced taxa pollen may skew the palynological results.

### 3. Methods

#### 3.1. Site sampling and palynological analysis

Four cores were retrieved from the southwest shore of Emaotfer Swamp (Wirrmann and Sémah, 2006). The longest one, Tfer06, sliced into continuous 1-cm width sections was sampled along its longitudinal axis. Three lithological sequences were identified from the base to the top of the core:

- unit I (from 480 to 431 cm) is composed of a homogenous clay-rich organic sediment, and has the slowest sedimentation rate of 0.14 mm/year;
- unit II (from 431 to 151 cm) is composed of pinkish to red-brown or white patches in a compact mud. Its sedimentation rate rose from 1.4 to 2.1 mm/year;
- unit III (from 151 cm to the top) corresponds to peat deposits, with a sedimentation rate of 1 mm/year.

Hereafter, we present a detailed palynological study of 16 samples, 8 from each section 433–426 cm and 151–108 cm.

Each sample of 1 g was prepared by cleaning with KOH (this cleaning was repeated twice for rich organic samples), and by elimination of the mineral phase, with a standard method using hot HF and HCl (adapted from Sittler, 1955). The residue was then mixed with a known volume of glycerol, and 50  $\mu$ l of this mixture was used to prepare pollen slides. On average 150–200 pollen grains and 30 taxa were identified on each slide, except for the barren samples (< 50 pollen grains counted). A total of more than 100 taxa were identified. The diverse pollen flora was determined by comparison with the collection of over 2000 slides held at the IRD (France), also with photographs and descriptions in Bulalacao (1997), Erdtman (1966), Ledru and Sémah (1992) and with regional reference collections currently held at the Department of Archaeology and Natural History of the Australian National University (<http://www.apsa.anu.edu.au>). Charcoals, (black, opaque and angular particles  $\geq 10 \mu$ m), as fire indicators (Whitlock and Larsen, 2001), were also counted. For each sample, the microcharcoal surface was estimated according to the Clark method (Clark, 1982). However, this method only indicates changes in small microcharcoal particles abundance (< 160  $\mu$ m), and does not fully represent fire patterns, due to the lack of coarser particles.

#### 3.2. Dating

The chronology is based on AMS radiocarbon ages obtained on 18 samples: bulk disseminated organic matter, vegetal remains, wood fragments and gastropod shells (Wirrmann et al., 2011a). The samples were prepared in the LMC14 Laboratory (UMS 2572, CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC) at Saclay (France), under the laboratory's routine quality control procedures (Cottureau et al., 2007). For charcoal and wood, the classical acid-alkali-acid pretreatment was applied to remove any CaCO<sub>3</sub>, humic acid contaminants and to ensure the removal of the modern atmospheric CO<sub>2</sub>.

Radiocarbon ages, including those taken from the literature, were calibrated using Oxcal 4.2.2 with the Southern Hemisphere data set (Bronk Ramsey and Lee, 2013; McCormac et al., 2004; Stuiver and Pearson, 1993) and the two-sigma probability ranges, noted cal yr BP (Table 1). The <sup>14</sup>C division between the Northern and Southern Hemisphere is represented by the ITCZ (Inter-Tropical Convergence Zone). Even if the SPCZ, with merges with the ITCZ, moves over Vanuatu half the year, we chose to use the Southern Hemisphere calibration curve, in order to provide comparable results between the whole core Tfer06 and palaeoenvironmental data from the Southwest Pacific area, especially New-Caledonia, located at 22°S. The curve of the age-depth model was deduced by fitting a smoothed curve to the age by applying a Stineman function to the data (Fig. 2). The curve of the age-depth model generated on the same dates by Bayesian statistics (P-sequence model, Oxcal 4.2.2) matches the curve obtained from the smooth: that is why we kept the smooth polynomial model to present the interpretation of the palaeoenvironmental data obtained on core Tfer06.

The seven dates asterisked in Table 1 are considered as presenting sediment reworking (signs of transportation and/or allochthonous material, mostly roots), and thus were not taken into account in the age-depth model.

### 4. Results

The ecological interpretations are based on Backer and Bakhuizen van den Brink, 1965; Munzinger and Lowry (2011), Siméoni (2009), Smith (1979) and Wheatley (1992). As Chenopodiaceae (recently included in Amaranthaceae family) reaches high percentages values in the pollen diagram, total pollen sum does not count this taxon.

Pollen taxa are presented according to the six following ecological groups (Fig. 3):

- rainforest mainly consists of Araliaceae, Cunoniaceae, Menispermaceae, Myrtaceae (especially *Syzygium*), *Peperomia*, *Podocarpus*, *Freycinetia*, *Dysoxylon*, *Ascarina*, *Ardisia*, *Nauclea* and *Tapeinospermum*;
- disturbed vegetation comprises Euphorbiaceae (*Acalypha*, *Mallotus/Macaranga*, *Homalanthus*) Ulmaceae – except *Celtis*, Malpighiaceae, Moraceae, Urticaceae, *Myrsine*, *Merremia*, *Piper/Macropiper*;
- mixed deciduous lowland forest is characterized by Fabaceae (including Mimosoideae), Rutaceae, Burseraceae, Sapindaceae, Asteraceae, Poaceae, Chenopodiaceae, *Celtis*, *Maesa*, and *Gardenia*. For convenience, we

**Table 1**

Radiocarbon ages (LMC14 UMS 2572, CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC, France), obtained on core Tfer06 calibrated applying Oxcal 4.2.2 (Bronk Ramsey and Lee, 2013; <https://www.c14.arch.ox.ac.uk>), and the calibration curve ShCal 13. The asterisks indicate samples excluded from the age-depth model (see the Section 3.2).

**Tableau 1**

Âges radiocarbones (LMC14 UMS 2572, CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC, France), obtenus sur la carotte Tfer06, calibrés selon Oxcal 4.2.2 (Bronk Ramsey et Lee, 2013; <https://www.c14.arch.ox.ac.uk>) et courbe de calibration ShCal 13. Les astérisques indiquent les échantillons qui ne sont pas considérés dans le modèle d'âge-profondeur (voir Section 3.2).

| LMC 14 No.  | Samples (cm) | Dated material                   | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) | Conventional radiocarbon age | 2-sigma calibration (cal yr BP) |
|-------------|--------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| SacA 8798   | 90–91        | Peat                             | –26.6                     | 940 ± 30                     | 736–905                         |
| SacA 8799   | 141–142      | Peat                             | –21.4                     | 1630 ± 30                    | 1382–1543                       |
| SacA 8800*  | 159–160      | Wood                             | –23.6                     | 1295 ± 30                    | 1074–1269                       |
| SacA 8801*  | 173–174      | Thiarideae shell                 | –0.8                      | 2985 ± 30                    | 2973–3210                       |
| SacA 8802   | 173–174      | Vegetal                          | –23.9                     | 1800 ± 30                    | 1585–1740                       |
| SacA 10686* | 192–195      | Vegetal                          | –25.6                     | 1365 ± 30                    | 1184–1296                       |
| SacA 11603* | 253–254      | Bulk disseminated organic matter | –14.9                     | 2620 ± 30                    | 2500–2766                       |
| SacA 8803*  | 264–265      | Vegetal                          | –29.3                     | 1280 ± 30                    | 1069–1266                       |
| SacA 7992   | 301–302      | Vegetal                          | –27.4                     | 2250 ± 30                    | 2151–2331                       |
| SacA 7993   | 301–302      | Gastropod shell                  | –7.7                      | 2225 ± 30                    | 2096–2316                       |
| SacA7994    | 348–350      | Wood                             | –27.2                     | 2425 ± 45                    | 2329–2701                       |
| SacA 7995   | 376–377      | Vegetal                          | –28.1                     | 2605 ± 30                    | 2497–2759                       |
| SacA 27953* | 420–421      | Bulk disseminated organic matter | –11.4                     | 3900 ± 30                    | 4156–4413                       |
| SacA 11604* | 432–433      | Bulk disseminated organic matter | –19                       | 3550 ± 30                    | 3650–3883                       |
| SacA 7996   | 441–442      | Wood                             | –28.2                     | 3025 ± 30                    | 3006–3326                       |
| SacA 27954  | 450–451      | Bulk disseminated organic matter | –23.5                     | 3925 ± 30                    | 4161–4421                       |
| SacA 8804   | 461–462      | Bulk disseminated organic matter | –18.3                     | 4025 ± 30                    | 4296–4527                       |
| SacA 4819   | 478–479      | Bulk disseminated organic matter | –23.65                    | 5900 ± 60                    | 6496–6845                       |

call it seasonal forest in this paper. This forest is found on the leeward coasts of Vanuatu Islands, where the rainfall reduction during the dry season is amplified compared to the windward coasts. Nevertheless, some of these taxa can be found in disturbed vegetation. As the highest contents of disturbance indicators are not synchronous with the highest contents of seasonal taxa in the pollen diagram (Fig. 3), we considered that these groups have different ecological meanings. We opted for separating disturbed vegetation from seasonal forest;

- introduced taxa are constituted by Musaceae and *Phylla*;
- swampy vegetation is composed of Elaeocarpaceae, Polygonaceae, Cyperaceae, Nymphaeaceae, *Typha*;
- mangrove and coastal vegetation consists of Rhizophoraceae, Sapotaceae, *Excoecaria*, *Aegiceras*, *Sonneratia*, *Premna*, *Cocos*, *Pandanus*, *Argusia*, *Guettarda*, *Terminalia* and *Vitex*.

#### 4.1. Period 3790–3600 cal yr BP (core section 433–426 cm)

This sedimentary section is characterized by the occurrence of two consecutive pollen barren levels, which defines two subzones (Fig. 3, Fig. 4), from 3790 to 3760 and between 3680–3600 cal yr BP. The lower subzone, characterized by the end of the unit I (clay-rich organic sediment), presents the highest value for rainforest taxa (28–30%), dominated by Araliaceae, *Geissois*, *Ardisia* and *Nauclea*. The rainforest also reaches its maximum diversity. *Rhizophora* and *Sonneratia* dominate mangrove/littoral vegetation, also well represented (26%). Cyperaceae represent the only herbaceous taxa. This zone shows moderate levels of ferns, and a low charcoal value. In the upper subzone, the unit II replaces the unit I. The rainforest decrease (10–15%) is coeval with a markedly reduced diversity in mangrove taxa

(15%). These previous vegetation types are replaced by a vegetation marked by disturbance (32 to 50%), dominated by *Mallotus/Macaranga* and a slight increase in herbaceous taxa is showed by the onset of Poaceae (Fig. 3).

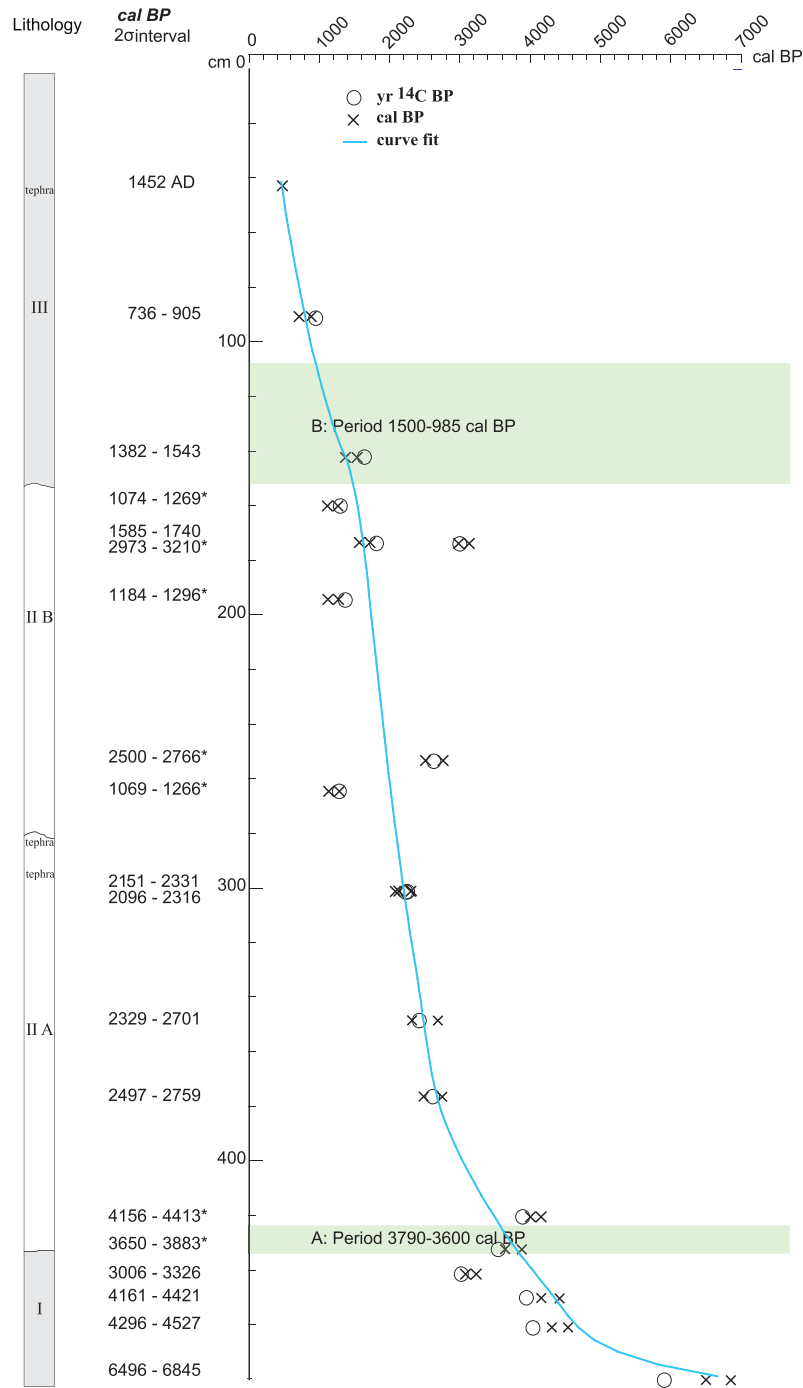
#### 4.2. Period 1500–990 cal yr BP (core section 151–108 cm)

Between 1500–1450 cal yr BP (Fig. 3, Fig. 4), corresponding to the onset of peat deposit, the vegetation remains relatively stable. Seasonal forest taxa reach maximum values (20 to 35%), with dominant Mimosoideae and Fabaceae. However, the following slight changes occur:

- Chenopodiaceae sometimes reach more than 50% of the total pollen sum;
- Nymphaeaceae appear, and herbaceous taxa (particularly Cyperaceae) increase;
- fern spores show their higher content (50 to 70%), arboreal taxa the minimum content (4 to 10%).

With the development of the peat unit, a microcharcoal peak, coeval with a palynological richness peak, is noticed. Introduced taxa, dominated by Musaceae, appear, and rise toward the end of the zone.

Due to this relative stability of the vegetation, we also studied two younger samples (1200 and 990 cal yr BP), from peat section (unit III – Fig. 3, Fig. 4), to assess environmental changes. Around 1200 cal yr BP, an increase in rainforest taxa (15%), especially *Geissois*, *Weinmania* (Cunoniaceae) and *Peperomia* is observed. A decrease in rainforest taxa occurs in the uppermost sample, while markers of disturbance and introduced taxa, in particular, rise. Palynological richness declines and microcharcoal particles are less prevalent.



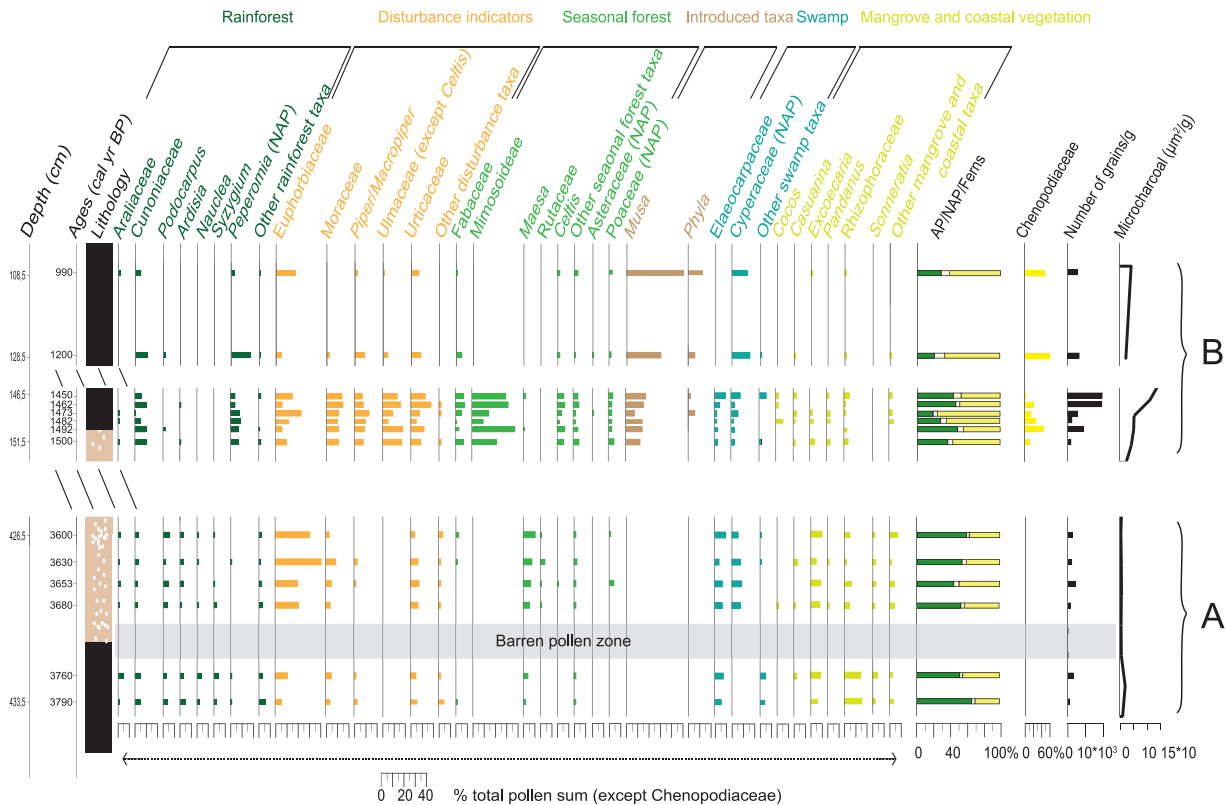
**Fig. 2.** (Color online.) Lithology and chronology of the core Tfer06. The age-depth model is undertaken by fitting a polynomial smoothed curve through the calibrated ages, without the dates asterisked (see Table 1 and Section 3.2 for explanation). The A and B zones correspond to the studied samples.

**Fig. 2.** (Couleur en ligne.) Lithologie et chronologie de la carotte Tfer06. Le modèle d'âge-profondeur est réalisé en ajustant les dates calibrées par une courbe lissée polynômiale, sans prendre en compte les dates avec astérisques (voir Tableau 1 et Section 3.2). Les zones A et B correspondent aux échantillons présentés dans ce papier.

## 5. Discussion: trends in vegetation, climate and human activity

The two sections show that rainforest dominated until 3700 cal yr BP, and was replaced afterwards by disturbed vegetation. The decline of the large trees found in rainforest, favouring an increase in runoff, and could explain

the rise in sedimentation rate after this date. As disturbed vegetation is principally composed of shrubs, the landscape opening allows larger water supply into the swamp. Between 1500–1450 cal yr BP, seasonal forest dominated with highest diversity and values. Since 1200 cal yr BP, rainforest then introduced taxa replaced the seasonal forest.



**Fig. 3.** (Color online.) Pollen diagram from sedimentary sequences A and B of core Tfer06. Non-arboreal pollen taxa are noted NAP, other taxa correspond to arboreal pollen or AP.

**Fig. 3.** (Couleur en ligne.) Diagramme pollinique issu de la séquence sédimentaire de la carotte Tfer06. Les grains de pollen non arborés sont notés NAP. Les autres taxa correspondent aux grains de pollen arborés ou AP.

### 5.1. Period 3790–3600 cal yr BP

An obvious change in the pollen record over this interval is observed. There was a rapid drop in the rainforest and mangrove/coastal vegetation, which were replaced by indicators of disturbance. This pollen signal, in conjunction with sedimentological and micro-faunal/floral studies (Wirrmann et al., 2011a) suggests drier conditions at this time. The barren pollen zone, volcanic ash-free, is probably due to the sediment oxidation from exposure of the substratum.

The palynological variations correlate with ENSO variability documented by previous works (Donders et al., 2008; Gagan et al., 2004; Moy et al., 2002). The replacement of rainforest by seasonal forest in 80 years could be linked to peak in sustained El Niño dated from 3700 yr BP (Brijker et al., 2007). The rainforest supported the first notable El Niño events until 3700 yr BP and then decreased. The Indonesian-Australian summer monsoon (IASM) decline from 4200 yr BP (Denniston et al., 2013, 2014) could also favour drier conditions in the area. A similar palaeoenvironmental pattern is observed in many Asian-West Pacific areas (Cabioch et al., 2008; Ellison, 1994; Haberle and Ledru, 2001; Haberle et al., 2001; Sémah and Sémah, 2012; Shulmeister and Lees, 1995; Wirrmann et al., 2011b), although in some tropical Pacific islands, changes in the pollen record, coeval

with increase in charcoal values, are observed only after 3000 yr BP, and are interpreted as signs of the onset of human impact (Hope et al., 1999, 2009; Stevenson, 2004).

However, the mangrove forest decrease illustrates a drop in sea level rather than a climatic change. The relative sea level-change across the Pacific can be summarized as a post glacial eustatic rise until 6000–4000 yr BP (Cabioch et al., 2003), followed by a Late Holocene hydro-isostatic drawdown (Dickinson, 2001). In Vanuatu co-seismic uplift, due to the subduction of the D'Entrecasteaux Ridge, has also to be taken into account (Lecolle et al., 1990, Neef and Veeh, 1977). Around 3700 yr BP, the end of the eustatic rise was coeval with tectonic uplift rate close to 1 mm/yr in the South of Efate which in turn induced a sea-level decrease, marked by the loss of mangrove forest. The occurrence of former rolled-coral in several archaeological sites (Bedford et al., 2007; Dickinson, 2001; Pineda and Galipaud, 1998) confirms that the sea level was higher than today when the first settlers arrived.

The emergence of the Lapita culture on Mussau (Papua New Guinea) is dated around 3400 cal yr BP (Denham et al., 2012). The dispersal of Lapita people occurred after the onset of regional drier conditions. Moreover, during El Niño phase, the easterly winds decline, facilitating the sail-powered transport from New Guinea to the eastern islands (Anderson et al., 2006). If the precise causes of this eastward



| Core section | Depth (cm)            | Calibrated ages (cal yr BP)<br>computed by age-depth<br>model |      |
|--------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|------|
| B            | 108                   | 990                                                           |      |
|              | 128                   | 1200                                                          |      |
|              | 146                   | 1450                                                          |      |
|              | 147                   | 1462                                                          |      |
|              | 148                   | 1473                                                          |      |
|              | 149                   | 1482                                                          |      |
|              | 150                   | 1492                                                          |      |
|              | 151                   | 1500                                                          |      |
| A            | 425                   | 3600                                                          |      |
|              | 426                   | 3630                                                          |      |
|              | 427                   | 3653                                                          |      |
|              | 428                   | 3680                                                          |      |
|              | Barren<br>pollen zone | 429                                                           | 3705 |
|              |                       | 430                                                           | 3730 |
|              |                       | 431                                                           | 3760 |
|              |                       | 432                                                           | 3790 |

**Fig. 4.** Computed ages for each studied sample, according to the age-depth model (see Section 3.2 and Fig. 3).

**Fig. 4.** Âges calculés issus du modèle d'âge-profondeur, pour chaque échantillon présenté dans ce papier (voir Section 3.2 et la Fig. 3).

migration remain unclear, yet El Niño events have to be taken into account in the settlement of Remote Oceania.

### 5.2. Period 1500–990 cal yr BP

Except increases in Cyperaceae, Chenopodiaceae, fern spores and microcharcoal particles, there are little significant variations in the pollen record between 1500 and 1450 cal yr BP. The vegetation remained broadly stable, while Wirrmann et al. (2011a) show lithological, microfaunal and -flora changes during this period: peat replaced poor-organic sediments and acidophilus diatom species replaced species of high conductivity water. The occurrence of these deposits, associated with an increase of fern spores and Cyperaceae, may correspond to a hydrosere succession. Adapted plants invade open water, reducing water flow, trapping sediment and contributing to the invasion by emergent vegetation. As peat accumulates, made up of the remains of this vegetation, the water body becomes progressively shallower. The high percentage of Chenopodiaceae pollen grains, often found in clumps, indicates close proximity of this vegetation type, and shows a decrease in water level, in agreement with the peat development. An increase in vegetation cover could prevent important runoff, resulting in a decline of sedimentation rate. However, the decrease in diatom species characteristic of saline conditions is inconsistent with shallower water (Van Dam

et al., 1994). It could be explained by an increase in humic compounds, due to higher-level vegetation decomposition.

The peak in microcharcoal particles shows an increase in fire intensity and/or quantity. This was possibly because of further sustained El Niño events, from 2000 to 1400 yr BP, peaking at 1500 yr BP, associated with a period of IASM rainfall minimum (Denniston et al., 2013, 2014; Gagan et al., 2004). But Cyperaceae, Chenopodiaceae and fern variations more certainly mark local environmental change, likely variations in water level, than a climate event. Hence, ENSO and IASM rainfall variations seem to have a low impact on the vegetation. We propose that human populations took advantage of these local drier conditions, or even favoured them by setting fires too, to cultivate different Musaceae (bananas). The occurrence of Phylla is an additional evidence of human influence on vegetation: this plant has presumably been cultivated for ornamental and medicinal use, and is now considered as a weed (Smith, 1979).

A significant change in the pollen record is observed around 1200 cal yr BP. There is a sharp decline of seasonal forest taxa, coeval with an increase in rainforest taxa, suggesting relatively wetter conditions, as observed at the same time in New-Caledonia (Wirrmann et al., 2011b). This could be linked to the decline in El Niño events after 1500 yr BP (Denniston et al., 2013, 2014; Gagan et al., 2004; Moy et al., 2002). But rainforest taxa values increased only 250 years after the onset of decline in El Niño events. One

could explain this fact by a rapid growth and reproduction of light-tolerant species (disturbed vegetation) compared to rainforest species (Chave, 1999, Prévost, 1983). Moreover, the increase in taxa such as *Geissois* and *Weinmania*, characteristic of higher altitudes, suggests lower regional temperatures compared to 3790 cal yr BP. At 990 cal yr BP, the significant rise in introduced taxa, coeval with a decrease in rainforest taxa, is interpreted as human impact; which suggests a more permanent settlement in this area, perhaps longer than during the Lapita period.

## 6. Conclusions

Our high-resolution palynological study shows:

- between 3790–3600 cal yr BP, the vegetation change presents a good covariance with sea-level change and ENSO phenomenon. These natural events certainly affected the mangrove forest and the rainforest, respectively;
- between 1500–990 cal yr BP, climatic variations had less influence on vegetation. Intensive agriculture could have prevented a return of the primary rainforest after 1200 cal yr BP, even if conditions became wetter;
- furthermore, human influence on vegetation has been demonstrated for the first time in Efate.

In summary, the vegetation dynamics details the timing of environmental changes already published. However, discriminating with certitude the climatic impact from the hydrologic, ecological and human activities on the vegetation is complex; these factors could occur at the same time.

The whole analysis of the core Tfer06, which covers the last 5 millennia, will allow us to study vegetation dynamics before and after the Lapita colonization. These results will be compared with other palaeoecological data obtained across the Southwest Pacific, to expand our knowledge of the relation between climate changes, human activities and vegetation dynamics during the Late Holocene.

## Acknowledgments

We would like to thank the team of the Herbarium of Vanuatu (Port Vila) and especially Chanel Sam for the helpful discussions, during our stay in Vanuatu and by mails afterward. We acknowledge the landowners for the facilities provided during the fieldwork, and the Ni Vanuatu population for the hospitality and availability. We are grateful to the anonymous reviewers for their review of the manuscript and suggestions that led to the improvement of the earliest version.

The reference collection for Vanuatu is carried out, for the most part, thanks to the IRD herbarium (NOU), Nouméa. This work was supported by the Research Unit Biogéochimie–Traceurs–Paléoclimats (BTP LOCEAN, UMR 7159, CNRS-IRD-UPMC-MNHN, France) and by the Department of Prehistory (UMR 7194, MNHN, France). Carbon dating was conducted at the IRD through UMS 2572 LMC14 (CEA-CNRS-IRD-IRSN-MCC, France). This study was financially supported by grants from Région Île-de-France (ref. 12016503).

## References

- Anderson, A., 2009. The rat and the octopus: initial human colonization and the prehistoric introduction of domestic animals to Remote Oceania. *Biol. Invasions* 11, 1503–1519.
- Anderson, A., Chappell, J., Gagan, M.K., Grove, R., 2006. Prehistoric maritime migration in the Pacific islands: a hypothesis of ENSO forcing. *Holocene* 16, 1–6.
- Anderson, D.E., Goudie, A.S., Parker, A.G., 2013. *Global environments through the quaternary: exploring environmental change*. Oxford University Press, Oxford.
- Asami, R., Iryu, Y., Hanawa, K., Miwa, T., Holden, P., Shinjo, R., Paulay, G., 2013. MIS 7 interglacial sea-surface temperature and salinity reconstructions from a southwestern subtropical Pacific coral. *Quat. Res.* 80, 575–585.
- Ash, R.P., Carney, J.N., McFarlane, A., 1978. *Geology of Efate and Offshore Islands, Mineral Survey Project (JDP 103)*. New Hebrides Government Geological Survey, Port Vila.
- Ash, R.P., Radford, N.W., Greehaum, D., Mallick, D.I.J., 1967–1970. In: Mallick, D.I.J. (Ed.), *Geology of Efate and Offshore Islands 1:100,00 New Hebrides Geological Survey sheet 9., 2nd Ed.* New Hebrides Geological Survey, Port Vila.
- Backer, C.A., Bakhuizen van den Brink Jr., R.C., 1965. *Flora of Java (spermatophytes only)*. Springer, Noordhoff.
- Bedford, S., 2009. Les traditions potières Erueti et Mangaasi du Vanuatu central: réévaluation et comparaison quarante ans après leur identification initiale. *J. Soc. Oceanistes* 128, 25–38.
- Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H.R., Valentin, F., Regenvanu, R., 2009. The Teouma Lapita site, South Efate, Vanuatu: a summary of Three Field Seasons (2004–2006). In: Sheppard, P.J., Thomas, T., Summerhayes, G.R. (Eds.), *International Lapita Conference 2007*. New Zealand Archaeological Association, Auckland NZ, pp. 215–234.
- Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., 2006. The Teouma Lapita site and the early human settlement of the Pacific Islands. *Antiquity* 80, 812–828.
- Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., Macgregor, C., Kuautonga, T., Sietz, M., 2007. The excavation, conservation and reconstruction of Lapita burial pots from the Teouma site, Efate, Central Vanuatu. *Terra Aust.* 26, 223–240.
- Bulalacao, L.J., 1997. *Pollen Flora of the Philippines*. National Museum Philippines and Research Council of the Philippines, Manila.
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Von Storch, H., Luterbacher, J., 2005. *Historical Climatology In Europe—The State Of The Art*. *Climatic Changes* 70, 363–430.
- Brijker, J.M., Jung, S.J.A., Ganssen, G.M., Bickert, T., Kroon, D., 2007. ENSO related decadal scale climate variability from the Indo-Pacific Warm Pool. *Earth Planet. Sci. Lett.* 253, 67–82.
- Bronk Ramsey, C., Lee, S., 2013. Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon* 55, 720–730.
- Cabioch, G., Banks-Culter, K.A., Beck, W.J., Burr, G.S., Corrège, T., Lawrence Edwards, R., Taylor, F.W., 2003. Continuous reef growth during the last 23 cal kyr BP in a tectonically active zone (Vanuatu, Southwest Pacific). *Quat. Sci. Rev.* 22, 1771–1786.
- Cabioch, G., Wirrmann, D., Sémah, A.-M., Corrège, T., Le Cornec, F., 2008. Evolution des paléoenvironnements dans le Pacifique lors de la dernière déglaciation : exemple en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. *J. Soc. Oceanistes* 126–127, 25–39.
- Chave, J., 1999. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. *Ecol. Model.* 124, 233–254.
- Cillauren, E., David, G., Grandperrin, R., 2001. *Atlas des pêcheries côtières de Vanuatu : un bilan décennal pour le développement/Coastal Fisheries Atlas of Vanuatu: a 10-Year Development Assessment*. IRD, Paris.
- Clark, R.L., 1982. Point count estimation of charcoal in pollen preparations and thin sections of sediments. In: Denizot, J. (Ed.), *Pollen et Spores 24*. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, pp. 523–535.
- Clement, A.C., Cane, M.A., Seager, R., 2001. An orbitally driven tropical source for abrupt climate change. *J. Climate* 14, 2369–2375.
- Corrège, T., Delcroix, T., Recy, J., Beck, W., Cabioch, G., Le Cornec, F., 2000. Evidence for stronger El Niño–Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral. *Paleoceanography* 14, 465–470.
- Cottureau, E., Arnold, M., Moreau, C., Baqu, D., Bavay, D., Caffy, I., Comby, C., Dumoulin, J.P., Hain, S., Perron, M., Salomon, J., Setti, V., 2007. *Artemis, the new <sup>14</sup>CAMS at LMC14 in Saclay, France*. *Radiocarbon* 49, 291–299.
- Denham, T., Bronk Ramsey, C., Specht, J., 2012. Dating the appearance of Lapita pottery in the Bismarck Archipelago and its dispersal to Remote Oceania. *Archaeol. Oceania* 47, 39–46.

- Denniston, R.F., Wyrwoll, K.-H., Victor, J.P., Brown, J.R., Asmerom, Y., Wanamaker Jr., A.D., Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D., Humphreys, W.F., 2013. A Stalagmite record of Holocene Indonesian-Australian summer monsoon variability from the Australian tropics. *Quat. Sci. Rev.* 78, 155–168.
- Denniston, R.F., Wyrwoll, K.-H., Victor, J.P., Brown, J.R., Asmerom, Y., Wanamaker Jr., A.D., Lapointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D., Humphreys, W.F., 2014. Corrigendum to "A stalagmite record of Holocene Indonesian-Australian summer monsoon variability from the Australian tropics". *Quat. Sci. Rev.* 87, 156–158 [*Quat. Sci. Rev.* 78 (2013) 155–168].
- Dickinson, W.R., 2001. Paleoshoreline record of relative Holocene sea levels on Pacific islands. *Earth Sci. Rev.* 55, 191–234.
- Donders, T.H., Haberle, S.G., Hope, G.S., Wagner, F., Visschera, H., 2007. Pollen evidence for the transition of the eastern Australian climate system from the post-glacial to the present-day ENSO mode. *Quat. Sci. Rev.* 26, 1621–1637.
- Donders, T.H., Wagner-Cremer, F., Visschera, H., 2008. Integration of proxy data and model scenarios for the mid-Holocene onset of modern ENSO variability. *Quat. Sci. Rev.* 27, 571–579.
- Ellison, J.C., 1994. Palaeo-lake and swamp stratigraphic records of Holocene vegetation and sea-level changes, Mangaia, Cook Islands. *Pac. Sci.* 48, 1–15.
- Erdtman, G., 1966. Pollen morphology and plant taxonomy. Hafner Publishing compagny, New-York.
- Fall, P.L., 2005. Vegetation change in the coastal-lowland rainforest at Avai'o'vuna Swamp, Vava'u, Kingdom of Tonga. *Quat. Res.* 64, 451–459.
- Field, J.S., Lape, P.V., 2010. Paleoclimates and the emergence of fortifications in the tropical Pacific islands. *J. Anthropol. Archaeol.* 29, 113–124.
- Field, J.S., Cochrane, E.E., Greenlee, D.M., 2009. Dietary change in Fijian prehistory: isotopic analyses of human and animal skeletal material. *J. Archaeol. Sci.* 36, 1547–1556.
- Gagan, M.K., Hendy, E.J., Haberle, S.G., Hantoro, W.S., 2004. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern oscillation. *Quat. Int.*, 118–119 (127–143).
- Galipaud, J.-C., 2004. Settlement history and landscape use in Santo, Vanuatu. In: Attenbrow, V., Fullagar, R. (Eds.), *A Pacific Odyssey: Archaeology and Anthropology in the western Pacific*. Papers in Honour of Jim Specht, Records of the Australian Museum, Supplement 29., Australian Museum, Sydney, pp. 59–64.
- Galipaud, J.-C., Reepmeyer, C., Torrence, R., Kelloway, S., White, P., 2014. Long-distance connections in Vanuatu: new obsidian characterisations for the Makué site, Aore Island. *Archaeol. Oceania* 49, 110–116.
- Garanger, J., 1972. Archéologie des Nouvelles-Hébrides. Contribution à la connaissance des îles du Centre. Société des Océanistes et O.R.S.T.O.M, Paris.
- Goudie, S.A., 2013. *The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future*, Seventh edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- Griffiths, M.L., Drysdale, R.N., Gagan, M.K., Frisia, S., Zhao, J.-x., Ayliffe, L.K., Hantoro, W.S., Hellstrom, J.C., Fischer, M.J., Feng, Y.-X., Swargadi, B.W., 2010. Evidence for Holocene changes in Australian-Indonesian monsoon rainfall from stalagmite trace element and stable isotope ratios. *Earth Planet. Sci. Lett.* 292, 27–38.
- Haberle, S.G., Ledru, M.-P., 2001. Correlations among charcoal records of fires from the past 16,000 years in Indonesia, Papua New Guinea and Central and South America. *Quat. Res.* 55, 97–104.
- Haberle, S.G., Hope, G.S., van der Kaars, S., 2001. Biomass burning in Indonesia and Papua New Guinea: natural and human induced fire events in the fossil record. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 171, 259–268.
- Haberle, S.G., Lentfer, C., O'Donnell, S., Denham, T., 2012. The palaeoenvironments of Kuk Swamp from the beginnings of agriculture in the highlands of Papua New Guinea. *Quat. Int.* 249, 129–139.
- Hope, G., O'Dea, D., Southern, W., 1999. Holocene vegetation histories in the Western Pacific: alternative records of human impact. In: Galipaud, J.-C., Lilley, I. (Eds.), *Le Pacifique de 5000 à 2000 avant le présent: suppléments à l'histoire d'une colonisation = The Pacific from 5000 to 2000 BP: colonization and transformations*. IRD, Paris, France, pp. 387–404.
- Hope, G., Stevenson, J., Southern, W., 2009. Vegetation histories from the Fijian Islands: alternative records of human impact. *Terra Aust.* 31, 68–87.
- Horrocks, M., Bedford, S., Spriggs, M., 2009. A short note on banana (*Musa*) phytoliths in Lapita, immediately post-Lapita and modern period archaeological deposits from Vanuatu. *J. Archaeol. Sci.* 36, 2048–2054.
- Kilbourne, K.H., Quinn, T.M., Taylor, F.W., Delcroix, T., Gouriou, Y., 2004. El Niño-Southern Oscillation-related salinity variations recorded in the skeletal geochemistry of a Porites coral from Espiritu Santo, Vanuatu. *Paleoceanography* 19, PA4002.
- Kinaston, R., Buckley, H., Bedford, S., Hawkins, S., 2013. Palaeodiet, horticultural transitions and human health during the Lapita and post-Lapita periods on Uripiv island, Northeast Malekula, Vanuatu (3000–2300 BP). *Homo* 64, 142–162.
- Kinaston, R., Buckley, H., Valentin, F., Bedford, S., Spriggs, M., Hawkins, S., Herrscher, E., 2014. Lapita Diet in Remote Oceania: New Stable Isotope Evidence from the 3000-Year-Old Teouma Site, Efate Island, Vanuatu. *PLoS ONE* 9, e90376.
- Lecolle, J.F., Bokilo, J.E., Bernat, M., 1990. Soulèvement et tectonique de l'île d'Éfaté (Vanuatu) arc insulaire des Nouvelles-Hébrides, au cours du Quaternaire récent. Datations de terrasses soulevées par la méthode U/Th. *Mar. Geol.* 94, 251–270.
- Ledru, M.-P., Sémah, A.-M., 1992. Atlas de quelques grains de pollen indonésiens. IRD, Saint Rémy lès-Chevreuse.
- Mackay, A., Battarbee, R., Briks, J., Oldfield, F., 2003. *Global Change in the Holocene*. Holder Arnold, New York.
- McCormac, F.G., Hogg, A.G., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Higham, T.F.G., Reimer, P.J., 2004. SHCal04 Southern Hemisphere calibration, 0–11,0 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1087–1092.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162–165.
- Munzinger, J., Lowry, P.P., 2011. Principal types of vegetation occurring on Santo. In: Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Eds.), *The natural history of Santo*. Publications scientifiques du Muséum, Paris, pp. 76–88.
- Neef, G., Veeh, H.H., 1977. Uranium series ages and Late Quaternary uplift in the New Hebrides. *Nature* 420, 682–683.
- Petchev, F., Spriggs, M., Bedford, S., Valentin, F., Buckley, H.R., 2014. Radiocarbon dating of burials from the Teouma Lapita cemetery, Efate, Vanuatu. *J. Archaeol. Sci.* 50, 227–242.
- Pineda, R., Galipaud, J.-C., 1998. Évidences archéologiques d'une sur-rection différentielle de l'île de Malo (archipel du Vanuatu) au cours de l'Holocène récent. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 327, 777–779.
- Prebble, M., Wilmshurst, J.M., 2008. Detecting the initial impact of humans and introduced species on island environments in Remote Oceania using palaeoecology. *Biol. Invasions* 11, 1529–1556.
- Prévost, M.F., 1983. Les fruits et les graines des espèces végétales pionnières de Guyane. *Rev. Ecol.* 38, 121–145.
- Robin, C., Ehen, J.-P., Monzier, M., 1993. Giant tuff cone and 12-km-wide associated caldera at Ambrym Volcano (Vanuatu, New Hebrides Arc). *J. Volcanol. Geoth. Res.* 55, 225–238.
- Rowe, C., McNiven, I.J., David, B., Richards, T., Leavesley, M., 2013. Holocene pollen records from Caution Bay, southern mainland Papua New Guinea. *Holocene* 23, 1130–1142.
- Sand, C., 2010. Lapita calédonien. Archéologie d'un premier peuplement insulaire océanien. Société des Océanistes, Paris.
- Schmid, M., 1987. Conditions d'évolution et caractéristiques du peuplement végétal insulaire en Mélanésie occidentale: Nouvelle-Calédonie, Vanuatu. *Bull. Soc. Zool. Fr.* 112, 233–254.
- Sémah, A.-M., Sémah, F., 2012. The rain forest in Java through the Quaternary and its relationships with humans (adaptation, exploitation and impact on the forest). *Quat. Int.* 249, 120–128.
- Shulmeister, J., Lees, B.G., 1995. Pollen evidence from Tropical Australia for the onset of an ENSO-dominated climate at C 4000 BP. *Holocene* 5, 10–18.
- Shutler, M.E., Shutler Jr., R., Bedford, S., 2002. Fifty years in the field: essays in honour and celebration of Richard Shutler Jr's Archaeological Career, Further detail on the Archaeological Explorations in the Southern New Hebrides, 1963–1964. In: Bedford, S., Sand, C., Burley, D. (Eds.), *NZAA Monograph 25*. New Zealand Archaeological Association, Auckland, pp. 189–206.
- Siméoni, P., 2009. Atlas du Vanouatou (Vanuatu). Géo-Consulte, Port Vila.
- Sittler, C., 1955. Méthodes et techniques physico-chimiques de préparation des sédiments en vue de leur analyse pollinique. *Rev. Inst. Fr. Pet.* X, 103–114.
- Smith, A.C., 1979. *Flora vitiensis nova*. Pacific tropical botanical garden, Honolulu.
- Stevenson, J., 2004. A Late-Holocene record of human impact from the southwest coast of New Caledonia. *Holocene* 14, 88–98.
- Stevenson, J., Hope, G., 2005. A comparison of late Quaternary forest changes in New Caledonia and north-eastern Australia. *Quat. Res.* 64, 372–383.
- Stuiver, M., Pearson, G.W., 1993. High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–500 BC and 2500–6000 BC. *Radiocarbon* 35, 1–23.

- Summerhayes, G.R., Leavesley, M., Fairbairn, A., 2009. Impact of human colonization on the landscape: a view from the western Pacific. *Pac. Sci.* 63, 725–745.
- Valentin, F., Buckley, H.R., Herrscher, E., Kinaston, R., Bedford, S., Spriggs, M., Hawkins, S., Neal, K., 2010. Lapita subsistence strategies and food consumption patterns in the community of Teouma (Efate, Vanuatu). *J. Archaeol. Sci.* 37, 1820–1829.
- Valentin, F., Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., 2011. Vanuatu Mortuary Practices over Three Millennia: Lapita to the Early European Contact Period. *J. Pac. Archaeol.* 2, 49–65.
- Valentin, F., Herrscher, E., Bedford, S., Spriggs, M., Buckley, H., 2014. Evidence for social and cultural change in central Vanuatu between 3000 and 2000 BP: comparing funerary and dietary patterns of the first and later generations at Teouma, Efate. *J. Island Coast. Archaeol.* 9, 381–399.
- Van Dam, H., Mertens, A., Sinkeldam, J., 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Aquat. Ecol.* 28, 117–133.
- Vincent, D.G., 1994. The South-Pacific Convergence Zone (SPCZ) – a review. *Mon. Weather Rev.* 122, 1949–1970.
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joss, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M., 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quat. Sci. Rev.* 27, 1791–1828.
- Wheatley, J.I., 1992. A guide to the common trees of Vanuatu. The Republic of Vanuatu's Department of Forestry, Port Vila.
- Whitlock, C., Larsen, C., 2001. Charcoal as a fire proxy. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 75–98.
- Wirrmann, D., Sémah, A.-M., 2006. Mission Vanuatu, 9 septembre au 2 décembre 2005. *Missions Sci. Terre Géol. Geophys.* 67 (IRD, Nouméa).
- Wirrmann, D., Eagar, S.H., Harper, M.A., Leroy, É., Sémah, A.-M., 2011a. First insights into mid-Holocene environmental change in central Vanuatu inferred from a terrestrial record from Emaotfer Swamp, Efate Island. *Quat. Sci. Rev.* 30, 3908–3924.
- Wirrmann, D., Sémah, A.-M., Debenay, J.-P., Chacornac-Rault, M., 2011b. Mid- to late Holocene environmental and climatic changes in New Caledonia, southwest tropical Pacific, inferred from the littoral plain Gouaro-Déva. *Quat. Res.* 76, 229–242.
- Witter, J.B., Self, S., 2007. The Kuwae (Vanuatu) eruption of AD 1452: potential magnitude and volatile release. *Bull. Volcanol.* 69, 301–318.
- Woodroffea, S., Horton, B., 2005. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific. *J. Asian Earth Sci.* 25, 29–43.
- Wyrтки, K., 1975. El niño - the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.* 5, 572–584.



## Annexe 1 : Photos des sites étudiés

Marais d'Emaotfer (photos : Claire Combettes - octobre 2013)



Frange de Cyperaceae



Ceinture arborée. A) *Pandanus sp.* et *Barringtonia racemosa* ;  
B) *Barringtonia racemosa*



Plateau entourant le marais. En arrière-plan, sur les hauteurs, se trouve une forêt dense



Vue prise dos au marais.  
La croix indique l'emplacement  
du cimetière de Teouma

Lac Otas (photos : Anne-Marie Sémah/Denis Wirrmann - octobre 2005)



Frange de Cyperaceae



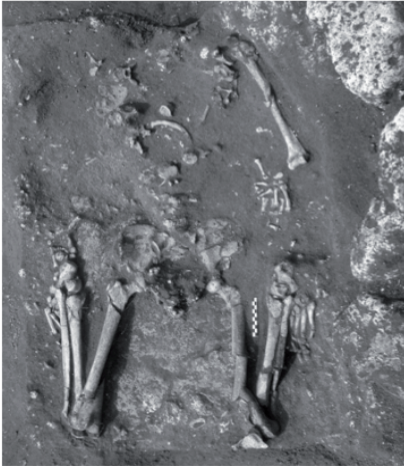
Ceinture arborée



Végétation anthropisée

## Annexe 2A : Sépultures du Vanuatu

### Le cimetière de Téouma



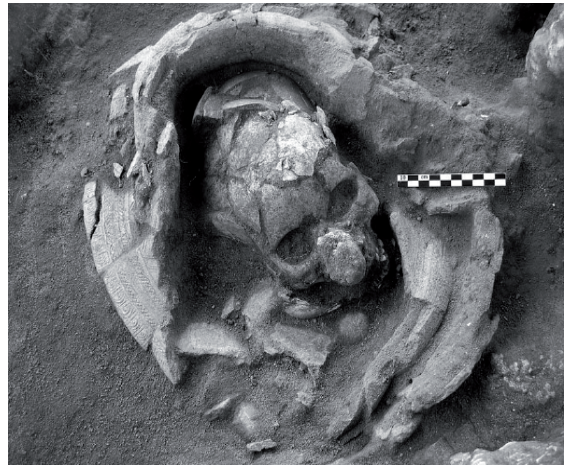
© F. Valentin



© F. Valentin



© F. Valentin



Bedford et al., 2007

Inhumations dans des positions diverses, dépôts secondaires dans un contexte sépulcral

### Roy Mata (Garanger, 1972)



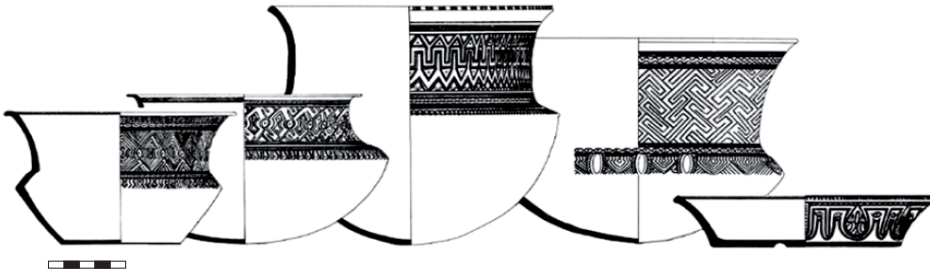
Sépulture de Roy Mata  
A) Bracelets de danse et pendentif en os et coquillages  
B) Bracelet en défense de porc



Grotte Fels, peintures de la paroi située à gauche de l'entrée  
Le personnage entouré serait vraisemblablement une représentation de Roy Mata

# Annexe 2B : Artéfacts préhistoriques du Vanuatu

## Culture Lapita



Poterie Lapita de Teouma

Bedford et al., 2007

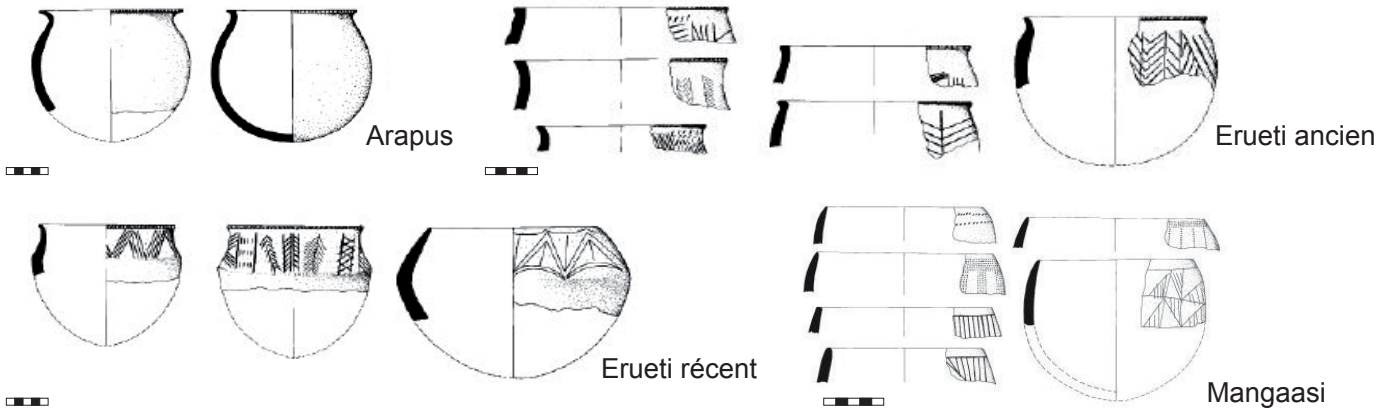


Artéfacts non céramiques :  
 A) Herminette en coquillage  
 B) Anneau en *Conus*  
 C) Hameçon en *Conus*

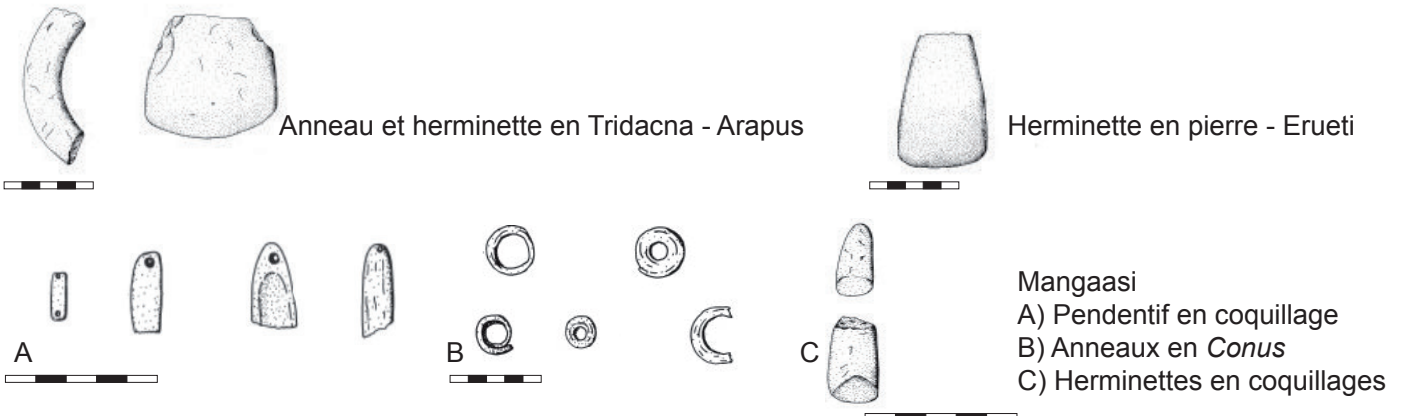
Szabó, 2010

## Cultures post-Lapita - Efate et les îles alentours

Poteries (Bedford, 2009)



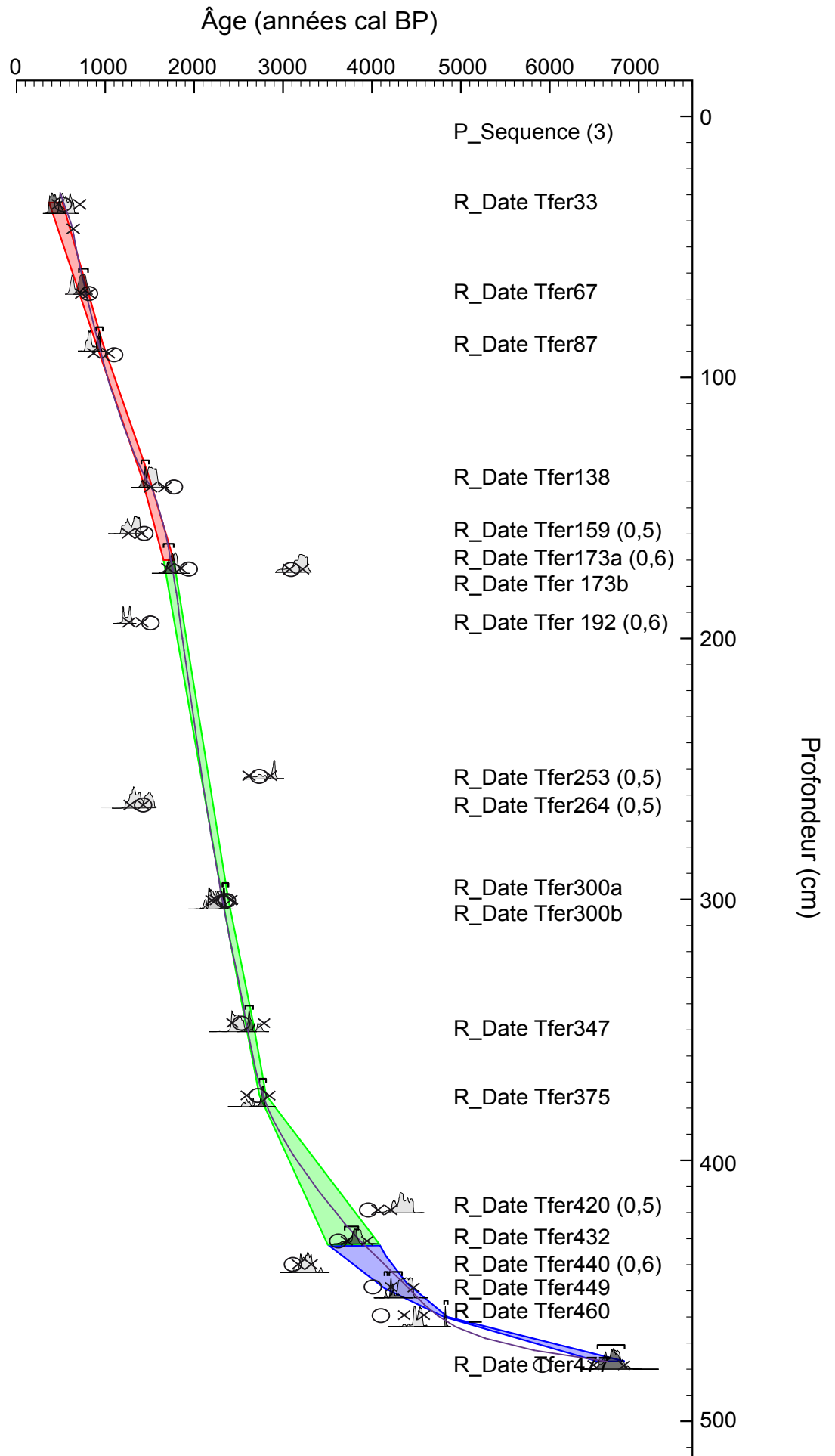
Artéfacts non céramiques (Bedford, 2006)



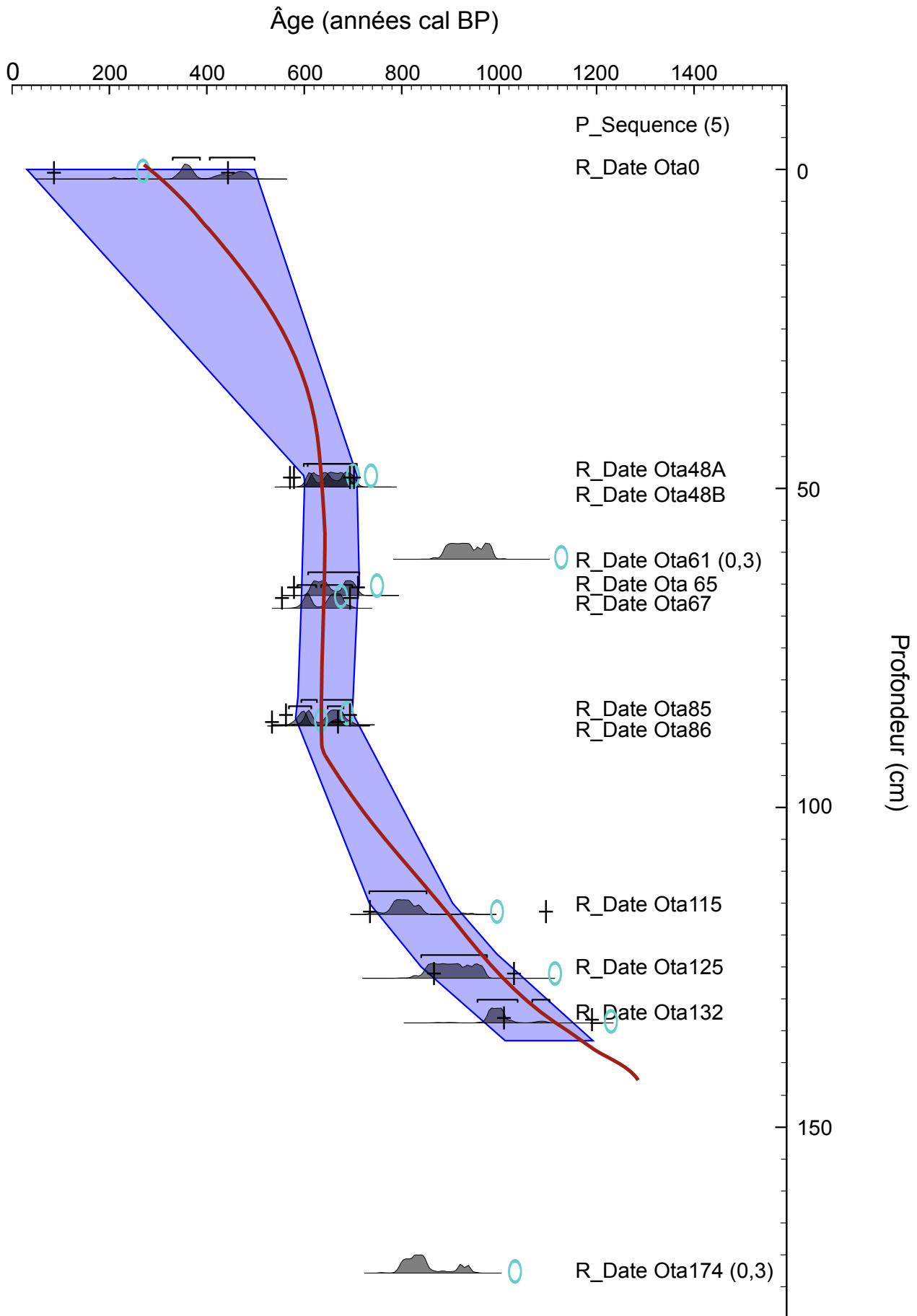
Taille de l'échelle : 5 cm



Annexe 3A : Modèle d'âge-profondeur (statistiques bayésiennes) de la carotte Tfer06



Annexe 3B : Modèle d'âge-profondeur (statistiques bayésiennes) de la carotte Ota2



## Annexe 4 : Observation et identification de la végétation autour du marais d'Emaotfer

### Plateau ouest :

#### ARBRES ET ARBUSTES :

*Veitchia montgomeriana* (Arecaceae)  
*Garuga* sp. (Burseraceae)  
*Diospyros* sp. (Ebenaceae)  
*Bishofia javanica* (Euphorbiaceae)  
*Cleidion speciforma* (Euphorbiaceae)  
*Macaranga tanarius* (Euphorbiaceae)  
*Adenanthera* sp. (Fabaceae)  
*Intsia bijuga* (Fabaceae)  
*Pterocarpus* sp. (Fabaceae)  
*Homalium* sp. (Flacourtiaceae)  
*Gyrocarpus* sp. (Hernandiaceae)  
*Sterculia banksiana* (Malvaceae)  
*Anthocarapa* sp. (Meliaceae)  
*Chisocheton* sp. (Meliaceae)  
*Dysoxylon* sp. (Meliaceae)  
*Antiaris* sp. (Moraceae)  
*Myristica* sp. (Myristicaceae)  
*Syzygium anaytiensis* (Myrtaceae)  
*Pisonia umbellifera* (Nyctaginaceae)  
*Ellatostachys* sp. (Sapindaceae)  
*Pouteria* sp. (Sapotaceae)  
*Dendrochride* sp. (Urticaceae)

#### HERBES :

Poaceae et Asteraceae

### Marais:

#### ARBRES ET ARBUSTES :

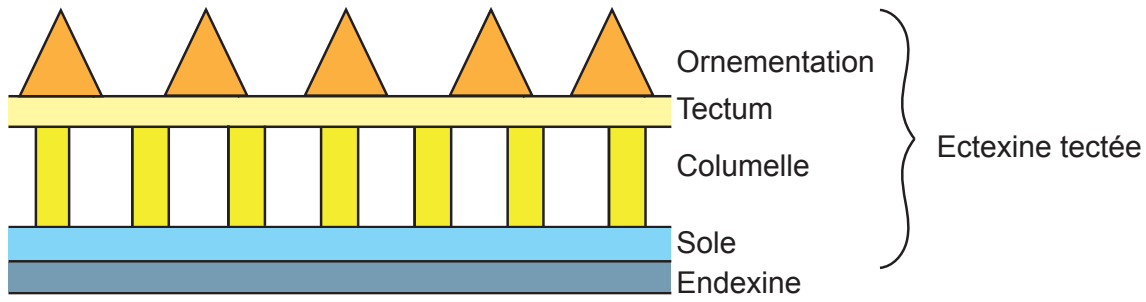
*Garuga* sp. (Burseraceae)  
*Erythrina fusca* (Fabaceae)  
*Gyrocarpus* sp. (Hernandiaceae)  
*Barringtonia racemosa* (Lecythidaceae)  
*Hibiscus tiliaceus* (Malvaceae)  
*Pandanus* sp. (Pandanaceae)

#### LIANES :

*Mikania micrantha* (Asteraceae)  
*Derris trifolia* (Fabaceae)  
*Entada gigas* (Fabaceae)  
*Cayratia trifolia* (Vitaceae)

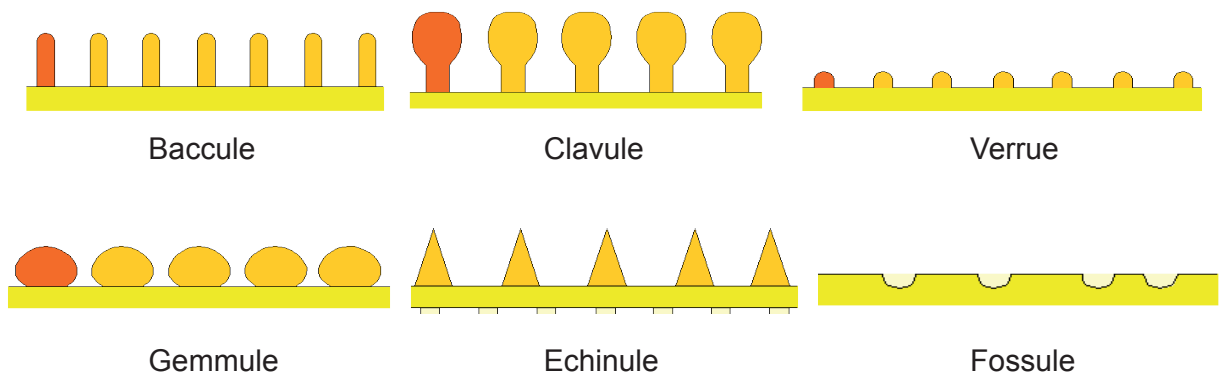
Fougères et mousses

## Annexe 5 : Coupe d'un grain de pollen fossile

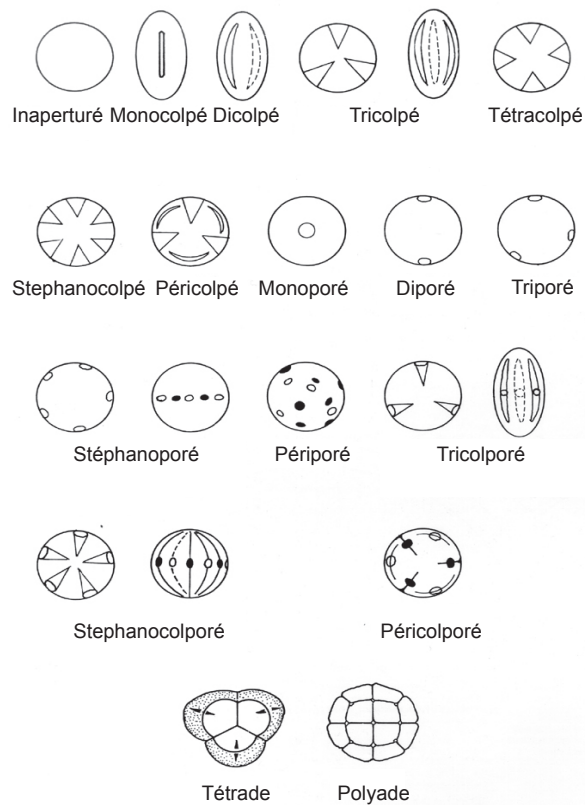


Une exine est intectée si elle ne possède ni columelle ni tectum

## Ornements



## Apertures



## Annexe 6 : Pollinisation, production et dispersion des grains de pollen des taxons les plus fréquemment rencontrés

| Genre                                | Pollinisation                    | Production en pollen | Dispersion des grains | Références                                              |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>TAXONS FORÊT TROPICALE HUMIDE</b> |                                  |                      |                       |                                                         |
| <i>Araliaceae</i>                    | Inconnue                         | Inconnue             | Inconnue              | /////                                                   |
| <i>Veitchia</i>                      | Insectes                         | Inconnue             | Locale                | Judd et al., 2000                                       |
| <i>Ascarina</i>                      | Vent                             | Forte                | Régional              | Endress, 1987                                           |
| <i>Geissois</i>                      | Oiseaux, chauves-souris          | Forte                | Inconnue              | Hopkins et al., 2015, for a review                      |
| <i>Weinmania</i>                     | Insectes                         | Inconnue             | Locale                | Hopkins et al., 2015, for a review                      |
| <i>Podocarpus</i>                    | Vent                             | Forte                | Régionale             | www.plantes-botanique.org                               |
| <i>Syzygium</i>                      | Eau, autopollinisation           | Inconnue             | Locale                | www.worldagroforestry.org                               |
| <i>Nauclea</i>                       | Insectes                         | Inconnue             | Locale                | Wheatley, 1992                                          |
| <i>Peperomia</i>                     | Insectes                         | Faible               | Local                 | Judd et al., 2000                                       |
| <b>TAXONS FORÊT SECONDAIRE</b>       |                                  |                      |                       |                                                         |
| <i>Elaeocarpus</i>                   | Insectes ?                       | Inconnue             | Local ?               | Irudhayaraj et Ramasubbu, 2014                          |
| <i>Glochidion</i>                    | Insectes                         | Forte                | Locale                | Judd et al., 2000                                       |
| <i>Homalanthus</i>                   | Insectes                         | Forte                | Inconnue              | Judd et al., 2000                                       |
| <i>Macaranga</i>                     | Insectes                         | Forte                | Régionale             | Fiala et al., 2011 ; Ishida et al., 2008                |
| <i>Mallotus</i>                      | Insectes                         | Forte                | Inconnue              | www.worldagroforestry.org                               |
| <i>Moraceae</i>                      | Insectes                         | Faible               | Locale                | Rasplus et al., 2003                                    |
| <i>Macropiper</i>                    | Insectes (surtout), vent         | Forte                | Locale                | Gardner, 1997                                           |
| <i>Piper</i>                         | Eau, insectes, autopollinisation | Assez forte          | Locale                | Kikuchi et al., 2007 ; Lebot et al., 1989, for a review |
| <i>Trema</i>                         | Vent, insectes                   | Forte                | Régionale             | Botineau, 2010, for a review                            |
| <i>Urticaceae</i>                    | Vent                             | Faible               | Inconnue              | www.plantes-botanique.org                               |
| <b>TAXONS FORÊT SEMI-DÉCIDUE</b>     |                                  |                      |                       |                                                         |
| <i>Garuga</i>                        | Inconnue                         | Inconnue             | Inconnue              | /////                                                   |
| <i>Mimosoidae</i>                    | Vent                             | Forte                | Inconnue              | Wheatley, 1992                                          |
| <i>Desmodium</i>                     | Insectes                         | Faible               | Locale                | Alemán et al., 2014                                     |
| <i>Pterocarpus</i>                   | Insectes                         | Faible               | Locale                | Louppe, 2008                                            |
| <i>Ellatostachys</i>                 | Vent                             | Inconnue             | Régionale             | Wheatley, 1992                                          |
| <i>Celtis</i>                        | Vent, insectes                   | Inconnue             | Régionale             | Botineau, 2010, for a review                            |
| <b>TAXONS INTRODUIITS</b>            |                                  |                      |                       |                                                         |
| <i>Musa</i>                          | Chauves-souris                   | Forte                | Inconnue              | Pesson et Louveaux, 1984                                |
| <i>Phylla</i>                        | Insectes                         | Inconnue             | Locale                | Estes et Brown, 1973                                    |

| TAXONS MANGROVE ET LITTORAL |                          |             |           |                                                   |
|-----------------------------|--------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------------------|
| <i>Cocos</i>                | Vent, eau                | Assez forte | Régionale | Botineau, 2010, for a review                      |
| <i>Casuarina</i>            | Vent                     | Forte       | Régionale | Wheatley, 1992                                    |
| <i>Calophyllum</i>          | Insectes                 | Inconnue    | Locale    | www.worldagroforestry.org                         |
| <i>Ipomea</i>               | Insectes                 | Faible      | Locale    | www.plantes-botanique.org                         |
| <i>Excoecaria</i>           | Insectes                 | Faible      | Locale    | Tomlinson, 1994                                   |
| <i>Rhizophora</i>           | Vent, eau                | Forte       | Régionale | Botineau, 2010, for a review                      |
| <i>Sonneratia</i>           | Chauves-souris           | Faible      | Locale    | Wang' ondu et al., 2013                           |
| TAXONS UBIQUISTES           |                          |             |           |                                                   |
| <i>Barringtonia</i>         | Insectes, chauves-souris | Faible      | Locale    | www.plantes-botanique.org, Jansen et Cardon, 2005 |
| <i>Pandanus</i>             | Vent, eau                | Forte       | Locale    | Botineau, 2010, for a review                      |
| TAXONS MARÉCAGE             |                          |             |           |                                                   |
| Amaranthaceae               | Insectes, vent           | Faible      | Locale    | Pesson et Louveaux, 1984                          |
| Cyperaceae                  | Vent                     | Inconnue    | Locale    | Botineau, 2010, for a review                      |
| Nymphaeaceae                | Insectes                 | Faible      | Locale    | Pesson et Louveaux, 1984                          |
| Asteraceae                  | Insectes                 | Faible      | Locale    | Judd et al., 2000                                 |
| Poaceae                     | Vent                     | Forte       | Régionale | Judd et al., 2000                                 |

## Annexe 6 : Pollinisation, production et dispersion des grains de pollen des taxons les plus fréquemment rencontrés (suite et fin)

Les données sur la production des grains de pollen sont qualitatives et non quantitatives, il n'existe pas, pour ces taxons, de chiffres associés.

Pour la dispersion des grains de pollen, « local » signifie une dispersion ne dépassant pas le kilomètre, tandis que « régional » indique une dispersion supérieure à un kilomètre

## Annexe 7 : les logiciels employés lors de cette thèse

- Oxcal (version 4.2.2) et Kaleidagraph (version 4.5.0) : Calibration des âges  $^{14}\text{C}$  (courbe ShCal13), réalisation des modèles d'âge-profondeur, basés sur des statistiques bayésiennes (Oxcal) ou sur une courbe polynomiales lissées (Kaleidagraph)
- Tilia (version 2.0.4) et Illustrator : Diagramme palynologique en fonction de la profondeur et du temps, analyse cluster (CONISS)
- Winseedle (version 4.3) et Photoshop/ImageJ (version 2.0.0) : Comptage et mesure (longueur, largeur, surface) des charbons de taille supérieure à  $160\ \mu\text{m}$
- Matlab (version 7.9.0.529) : ACP et cartes Topo-Organisatrices
- R (3.1.0) et Excel : Quantifications climatiques (fonction de densité de probabilité) et analyses statistiques fréquentielles classiques : fréquence, moyenne, écart-type, etc.

# Annexe 8A : ACP Tfer06

## Cas 1

### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 4,08423064 | 17,7575245  |
| 3,52561403 | 15,3287567  |
| 3,16828959 | 13,7751721  |
| 1,66400417 | 7,23480075  |
| 1,39520227 | 6,06609682  |
| 1,22618179 | 5,33122516  |
| 1,18979591 | 5,17302569  |
| 1,05721418 | 4,59658337  |
| 0,81654    | 3,55017392  |
| 0,77891883 | 3,3866036   |
| 0,60639588 | 2,63650385  |
| 0,57238771 | 2,48864223  |
| 0,45864966 | 1,99412897  |
| 0,38267061 | 1,66378527  |
| 0,34062361 | 1,48097222  |
| 0,33304655 | 1,44802848  |
| 0,25924979 | 1,127173    |
| 0,23024584 | 1,00106886  |
| 0,18845231 | 0,81935788  |
| 0,14869678 | 0,64650773  |
| 0,13496371 | 0,58679874  |
| 0,07056501 | 0,3068044   |

### Corrélations Variables/Axes

|               | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       | Axe 6       | Axe 7       | Axe 8       | Axe 9       |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae    | -0,27580807 | 0,12418489  | -0,02611978 | 0,04359217  | -0,54725217 | 0,02895873  | -0,11399246 | 0,01718956  | -0,12737855 |
| Veitchia      | 0,11145962  | 0,06461044  | -0,08405763 | 0,38464258  | -0,24400831 | -0,23340976 | 0,30050631  | 0,07114502  | 0,51592523  |
| Ascarina      | 0,03971232  | -0,00578169 | 0,21816025  | 0,41633226  | -0,17604905 | 0,36584217  | -0,03584095 | 0,14279807  | -0,08487451 |
| Cunoniaceae   | -0,05200169 | -0,11262601 | -0,41522467 | 0,21113287  | 0,13235939  | -0,04673841 | 0,14076848  | 0,17695177  | -0,0590734  |
| Podocarpus    | -0,3377695  | 0,09685045  | -0,11910943 | -0,14234173 | -0,35437823 | 0,04968123  | -0,17268456 | -0,12785322 | 0,02761808  |
| Peperomia     | 0,31784852  | 0,08638184  | -0,26377657 | 0,00939803  | 0,05363839  | 0,19418462  | -0,12810729 | 0,09498229  | 0,0753586   |
| Syzygium      | -0,28351607 | 0,19374632  | -0,1546179  | 0,18534724  | 0,00856859  | 0,06209373  | -0,04532718 | 0,37473833  | -0,10030857 |
| Nuclea        | -0,34864557 | 0,09315875  | -0,20272352 | 0,0482867   | 0,2762635   | 0,07004552  | 0,04362775  | 0,12510335  | 0,01155036  |
| Elaeocarp.    | -0,35625443 | 0,0698189   | -0,25725572 | 0,07167485  | 0,18254074  | -0,04790533 | -0,04518293 | 0,03556876  | -0,09716116 |
| Euphorbiaceae | -0,15208282 | -0,14192074 | 0,46178711  | -0,01646312 | 0,09922442  | 0,01544109  | -0,05928389 | -0,01357655 | 0,21575975  |
| Moraceae      | -0,14671383 | -0,35216236 | -0,13293672 | 0,02195778  | 0,05833463  | 0,15565106  | -0,14839232 | -0,10310958 | 0,12184166  |
| (Macro)Piper  | 0,20466152  | -0,14517347 | -0,20999021 | -0,30261313 | -0,14236889 | 0,34569031  | 0,00268711  | 0,07605911  | -0,15757566 |
| Trema         | 0,01379528  | -0,35344578 | 0,23279348  | 0,10202512  | 0,21001614  | -0,23500022 | -0,22526725 | 0,20873989  | -0,02418553 |
| Urticaceae    | -0,07994023 | 0,20886892  | 0,03026715  | -0,08896691 | -0,1488685  | 0,07864674  | 0,62366331  | -0,30066399 | -0,18037578 |
| Fabaceae      | 0,01470404  | -0,29675603 | 0,31823438  | 0,08768133  | 0,08653078  | -0,25417041 | 0,13809908  | -0,14071542 | -0,05758822 |
| Mimosoidae    | 0,09805795  | -0,36687961 | -0,07441178 | 0,12887325  | -0,28164766 | 0,1289086   | 0,03563821  | 0,06293752  | -0,20915919 |
| Euodia        | -0,22143617 | 0,03670096  | -0,01277277 | 0,07718509  | 0,32031     | 0,38936132  | 0,06227122  | -0,51246003 | 0,14180211  |
| Sapindaceae   | 0,04726978  | 0,21858374  | -0,04356653 | 0,31670719  | -0,11461003 | -0,16094726 | -0,32718692 | -0,50626062 | -0,03899884 |
| Celtis        | 0,02980951  | -0,33779287 | -0,14872034 | 0,06370456  | -0,06564141 | -0,27561359 | -0,36955751 | -0,21230445 | -0,18614313 |
| Musa          | 0,30641668  | 0,23780204  | -0,14700816 | 0,16932079  | 0,03246663  | -0,11256263 | 0,12732288  | -0,13953506 | -0,00571452 |
| Phyla         | 0,28251589  | 0,29800682  | -0,08885008 | -0,24118576 | 0,13184114  | 0,01834333  | -0,13303197 | -0,04062342 | -0,20025206 |
| Poaceae/Aster | 0,14738273  | -0,03072278 | 0,10084767  | 0,48367172  | 0,14925041  | 0,32981578  | -0,04238367 | -0,02721123 | -0,29532133 |

## Cas 2

### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 3,30961193 | 19,4683054  |
| 2,61207033 | 15,3651196  |
| 1,92655227 | 11,3326781  |
| 1,56938339 | 9,23166702  |
| 1,29257416 | 7,60337738  |
| 1,06344393 | 6,25555255  |
| 1,02202979 | 6,01193993  |
| 0,78795965 | 4,63505677  |
| 0,63109447 | 3,71232043  |
| 0,54358542 | 3,19756132  |
| 0,47737876 | 2,80811034  |
| 0,38549673 | 2,2667278   |
| 0,36323496 | 2,13667622  |
| 0,30850677 | 1,8147457   |
| 0,2820727  | 1,65925116  |
| 0,25318542 | 1,48932602  |

### Corrélations Variables/Axes

|               | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       | Axe 6       | Axe 7       |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae    | -0,34610273 | 0,04510567  | -0,02762965 | 0,19133477  | -0,48119649 | 0,01863551  | -0,14214753 |
| Veitchia      | 0,12797262  | -0,01423243 | -0,15314067 | 0,39927388  | -0,22347217 | -0,38811935 | 0,32452194  |
| Ascarina      | 0,03965076  | 0,11438565  | 0,30140271  | 0,50229287  | 0,04423418  | 0,00330303  | -0,31878195 |
| Cunoniaceae   | -0,00583422 | -0,35492263 | -0,40690729 | 0,15785998  | 0,15625913  | -0,19621847 | -0,02017146 |
| Podocarpus    | -0,40819086 | -0,03119564 | -0,12552911 | -0,02808292 | -0,32864898 | 0,21973744  | -0,14954056 |
| Peperomia     | 0,34675722  | 0,00622029  | -0,35789855 | 0,00913349  | -0,00625449 | 0,08354549  | -0,37012291 |
| Syzygium      | -0,32870995 | 0,06225766  | -0,3118834  | 0,23877377  | 0,04206738  | -0,20160432 | -0,17871713 |
| Nuclea        | -0,36777177 | -0,0716375  | -0,32516354 | 0,04628574  | 0,31007493  | -0,04749679 | -0,00201339 |
| Fabaceae      | 0,08741446  | -0,4822877  | -0,18282843 | -0,00757005 | 0,04589438  | 0,0102761   | 0,26661922  |
| Mimosoidae    | 0,14420678  | -0,40278552 | 0,23834819  | 0,18838108  | -0,12333412 | -0,00449062 | -0,1042386  |
| Euodia        | -0,22951711 | 0,01751106  | -0,05187189 | 0,10364769  | 0,49965217  | 0,45666366  | 0,11995237  |
| Sapindaceae   | 0,04815213  | 0,18516315  | -0,22835147 | 0,310442    | -0,27087625 | 0,55042913  | 0,30210744  |
| Celtis        | 0,087484    | -0,43060799 | 0,061991    | -0,03057798 | -0,1913265  | 0,34448929  | 0,19947494  |
| Musa          | 0,33594929  | 0,22109839  | -0,33596216 | 0,11965594  | -0,08598623 | -0,03962872 | 0,10248012  |
| Phyla         | 0,25909755  | 0,32004498  | -0,26214485 | -0,25439704 | -0,01976562 | 0,12358887  | -0,06269235 |
| Poaceae/Aster | 0,19227246  | 0,05128932  | 0,13644857  | 0,49206334  | 0,31120248  | 0,15237531  | -0,05995139 |

## Cas 3

### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 3,03606047 | 20,2404031  |
| 2,32819484 | 15,5212989  |
| 1,51841796 | 10,1227864  |
| 1,36235576 | 9,08237171  |
| 1,24320452 | 8,28830102  |
| 1,04393691 | 6,95957938  |
| 1,00864554 | 6,72430358  |
| 0,75086069 | 5,00573793  |
| 0,57854957 | 3,85699713  |
| 0,49105169 | 3,27367792  |
| 0,454473   | 3,02981997  |
| 0,3783686  | 2,52245735  |
| 0,33566037 | 2,2377358   |
| 0,26492844 | 1,76618962  |

### Corrélations Variables/Axes

|               | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       | Axe 6       | Axe 7       |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae    | -0,3528371  | 0,09148878  | -0,0449835  | 0,46267334  | -0,26635512 | 0,04883655  | -0,13038861 |
| Veitchia      | 0,1075534   | 0,00241642  | -0,41525622 | 0,07957152  | -0,3306854  | 0,26659884  | 0,44930084  |
| Ascarina      | 0,02854927  | -0,27413353 | -0,31382778 | 0,40865668  | 0,2644352   | 0,16222497  | -0,31116969 |
| Cunoniaceae   | 0,07529164  | 0,48391626  | -0,27490659 | -0,12204156 | 0,07620846  | -0,22292332 | 0,02272227  |
| Podocarpus    | -0,38890697 | 0,22848728  | 0,08476808  | 0,24210986  | -0,20227481 | -0,19163892 | -0,19193821 |
| Peperomia     | 0,28137027  | 0,03800342  | -0,29099505 | -0,36275202 | -0,33989438 | -0,12178165 | -0,33915959 |
| Syzygium      | -0,36947975 | 0,18417459  | -0,32903948 | -0,02135543 | -0,02513783 | 0,26396196  | -0,10071052 |
| Nuclea        | -0,35478696 | 0,32441629  | -0,16408039 | -0,20847483 | 0,22286694  | 0,06871368  | 0,01061586  |
| Fabaceae      | 0,23899827  | 0,47339081  | 0,00122434  | 0,03426411  | 0,11054029  | -0,02028162 | 0,25698772  |
| Mimosoidae    | 0,32085524  | 0,18177803  | -0,01251327 | 0,43821763  | 0,12802095  | 0,12529541  | -0,06750484 |
| Euodia        | -0,22423277 | 0,07409951  | -0,14354395 | -0,14115102 | 0,51753903  | -0,43947719 | 0,01133543  |
| Sapindaceae   | -0,05720309 | -0,08175626 | -0,39686022 | 0,11759922  | -0,29869931 | -0,63297785 | 0,25318892  |
| Celtis        | 0,24652759  | 0,33125575  | 0,16130015  | 0,35234192  | 0,08000369  | -0,2944419  | 0,12819904  |
| Poaceae/Aster | 0,18328189  | -0,2080824  | -0,46651546 | 0,0992674   | 0,34789128  | -0,06677485 | -0,05410022 |

## Cas 4

### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 2,94690076 | 22,6684674  |
| 1,63635786 | 12,5873681  |
| 1,39212244 | 10,7086341  |
| 1,31050279 | 10,0807907  |
| 1,18952624 | 9,15020187  |
| 0,98817372 | 7,60133631  |
| 0,89521338 | 6,88625674  |
| 0,73759716 | 5,67382432  |
| 0,54957056 | 4,22746583  |
| 0,4538547  | 3,49119001  |
| 0,3695395  | 2,84261152  |
| 0,31246018 | 2,40353983  |

### Corrélations Variables/Axes

|               | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae    | -0,36486445 | 0,04557599  | -0,42063156 | 0,17163317  | -0,26765652 |
| Veitchia      | 0,10547737  | -0,22712109 | -0,32919405 | -0,25093665 | -0,31864475 |
| Ascarina      | 0,08075315  | 0,42829759  | -0,29787605 | 0,37243746  | 0,13705544  |
| Podocarpus    | -0,42670679 | 0,24087921  | -0,26444459 | 0,00469727  | -0,06395468 |
| Peperomia     | 0,2836492   | 0,00279833  | -0,07137105 | -0,61664114 | 0,02681753  |
| Syzygium      | -0,39722661 | -0,11314886 | -0,20653658 | -0,19311473 | 0,07027563  |
| Nuclea        | -0,41359146 | 0,06452494  | 0,00626352  | -0,21506235 | 0,35428541  |
| Mimosoidae    | 0,28368437  | 0,24726451  | -0,40959652 | 0,25809004  | 0,17043539  |
| Euodia        | -0,23954004 | -0,12330048 | 0,08018577  | -0,02850178 | 0,63348839  |
| Sapindaceae   | -0,04392658 | -0,28402896 | -0,36677813 | -0,30421943 | -0,09374284 |
| Celtis        | 0,17692996  | 0,44809278  | -0,31873012 | 0,17038876  | 0,19045356  |
| Poaceae/Aster | 0,22148699  | -0,45473239 | -0,20045347 | 0,05424852  | 0,36500508  |

Variable la plus corrélée à un axe  
Variable la plus anticorrélée à un axe

Cas 1 : toutes les variables (taxons) observées plus de 5 fois dans la carotte, à l'exception des taxons de marécages et de littoral/mangrove

Cas 2 : variables du cas 1 sans les taxons de la forêt secondaire

Cas 3 : variables du cas 2 sans les taxons introduits

Cas 4 : variables du cas 2 sans les Cunoniaceae et les Fabaceae, taxons très corrélés ou anticorrélés à l'un des deux premiers axes du cas 3



## Annexe 8B : ACP Ota2

### Cas 1

#### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 4,46542993 | 22,3271496  |
| 3,86580495 | 19,3290248  |
| 3,01104824 | 15,0552412  |
| 2,04789823 | 10,2394912  |
| 1,44355513 | 7,2177566   |
| 1,26023834 | 6,30119172  |
| 1,05120776 | 5,25603881  |
| 0,91344535 | 4,56722676  |
| 0,79199104 | 3,95995519  |
| 0,38895162 | 1,9447581   |
| 0,31410242 | 1,57051211  |
| 0,30538008 | 1,52690041  |
| 0,11407738 | 0,57038692  |
| 0,02686951 | 0,13434755  |
| 0          | 0           |
| 0          | 0           |
| 0          | 0           |
| 0          | 0           |
| 0          | 0           |

#### Corrélations Variables/Axes

|               | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       | Axe 6       | Axe 7       |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae    | -0,03280229 | -0,12722633 | 0,38896398  | -0,0931723  | -0,3753778  | 0,18419203  | 0,28745477  |
| Veitchia      | -0,35412434 | 0,13736649  | -0,23292203 | -0,08955807 | 0,02395396  | -0,25515328 | -0,05116451 |
| Ascarina      | -0,12047199 | -0,29484964 | -0,30809084 | 0,25170056  | -0,08161352 | -0,26446774 | 0,19675834  |
| Cunoniaceae   | 0,21666867  | 0,1651482   | -0,2131179  | 0,08085194  | 0,27123353  | 0,35015243  | -0,36280663 |
| Syzygium      | -0,14819619 | -0,30830783 | -0,33298822 | 0,26133836  | -0,07753715 | 0,09712313  | -0,0730082  |
| Symplocos     | 0,01434652  | 0,09648901  | -0,27735323 | -0,40841024 | -0,07913345 | -0,07152261 | -0,18015614 |
| Fabaceae      | -0,02777407 | -0,39574156 | -0,11740339 | 0,01377035  | -0,20571183 | 0,26099653  | -0,37592808 |
| Acacia        | 0,36267791  | 0,04836188  | -0,01859638 | 0,2402588   | 0,13943915  | -0,30045804 | -0,04516702 |
| Celtis        | -0,25591413 | 0,08934129  | 0,28985958  | 0,18996817  | 0,00445806  | -0,25050322 | -0,34092079 |
| Euphorbiaceae | -0,33114476 | 0,09146058  | 0,18209274  | -0,27627646 | 0,16451816  | 0,28630247  | 0,20735599  |
| Malpighiaceae | -0,07760835 | -0,38918232 | 0,08763856  | 0,13632713  | 0,13455765  | -0,13757226 | -0,00894507 |
| Geniostoma    | -0,226502   | 0,28702691  | 0,032064    | -0,02658253 | -0,25197198 | -0,39026897 | -0,24582455 |
| Moraceae      | 0,4002664   | -0,01657445 | 0,00013617  | -0,07728943 | -0,34297467 | 0,10300377  | -0,09329532 |
| (Macro)Piper  | 0,41369247  | -0,09239188 | 0,16210786  | -0,09381667 | 0,03651646  | -0,19595907 | -0,12735236 |
| Trema         | -0,08028864 | 0,18980252  | 0,11057347  | 0,26613879  | -0,58935404 | 0,15432069  | -0,24535819 |
| Urticaceae    | 0,18735313  | 0,31741495  | 0,18538847  | 0,25425337  | 0,08019975  | -0,08325614 | 0,09444738  |
| Musa          | 0,01947337  | 0,12364737  | -0,2405029  | -0,41927622 | -0,05547879 | -0,02706504 | -0,15930761 |
| Asteraceae    | -0,10296015 | -0,2684161  | 0,32033693  | -0,15171412 | 0,15415887  | -0,1106     | -0,30734466 |
| Poaceae       | -0,20261432 | 0,20001174  | 0,06551155  | 0,31458185  | 0,27269693  | 0,35018851  | -0,21848898 |

### Cas 2

#### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 2,65678037 | 22,1398364  |
| 2,48733617 | 20,7278014  |
| 1,94699374 | 16,2249479  |
| 1,56705365 | 13,0587804  |
| 1,02212236 | 8,51768632  |
| 0,87091305 | 7,25760873  |
| 0,74490721 | 6,20756008  |
| 0,30054772 | 2,50456431  |
| 0,24317217 | 2,02643472  |
| 0,1125804  | 0,93817004  |
| 0,0348072  | 0,29005999  |
| 0,01278596 | 0,10654967  |

#### Corrélations Variables/Axes

|             | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       | Axe 5       |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae  | -0,33436661 | 0,33086221  | -0,15165782 | 0,31923351  | -0,02458746 |
| Veitchia    | -0,03860939 | -0,26155545 | 0,58029279  | 0,03395065  | 0,17198082  |
| Ascarina    | -0,26655265 | -0,48548158 | -0,08117975 | -0,14792773 | 0,38925609  |
| Cunoniaceae | 0,40842795  | -0,08902744 | -0,12600852 | -0,28811202 | -0,45793896 |
| Syzygium    | -0,27721479 | -0,50435135 | -0,09766185 | -0,23448466 | -0,07319697 |
| Symplocos   | 0,25600809  | -0,22347319 | 0,15670237  | 0,39513185  | -0,21831866 |
| Fabaceae    | -0,32898263 | -0,31533452 | -0,25693926 | 0,07173367  | -0,53864319 |
| Acacia      | 0,25672503  | 0,11793351  | -0,43557119 | -0,26421192 | 0,2293725   |
| Celtis      | -0,28939066 | 0,27195755  | 0,37885884  | -0,22704836 | 0,00391267  |
| Musa        | 0,2892558   | -0,1871132  | 0,20601538  | 0,40147356  | -0,08763569 |
| Asteraceae  | -0,40589709 | 0,19171662  | -0,01737098 | 0,15745115  | -0,29423754 |
| Poaceae     | 0,01227798  | 0,12295709  | 0,37640438  | -0,51812878 | -0,34431024 |

### Cas 3

#### Ordre de grandeur des axes

| Unité      | Pourcentage |
|------------|-------------|
| 2,61749502 | 26,1749502  |
| 1,83820107 | 18,3820107  |
| 1,36917625 | 13,6917625  |
| 1,27711218 | 12,7711218  |
| 0,96512313 | 9,65123128  |
| 0,81576561 | 8,15765611  |
| 0,70886223 | 7,08862227  |
| 0,23115746 | 2,31157465  |
| 0,13252673 | 1,32526734  |
| 0,04458031 | 0,44580307  |

#### Corrélations Variables/Axes

|             | Axe 1       | Axe 2       | Axe 3       | Axe 4       |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Araliaceae  | -0,43074136 | 0,06116908  | -0,08523018 | 0,46239872  |
| Ascarina    | -0,05676758 | 0,44559359  | 0,33480601  | -0,49087414 |
| Symplocos   | 0,30441017  | 0,25354834  | -0,44459095 | -0,04774741 |
| Cunoniaceae | 0,4267193   | -0,20883592 | 0,16215579  | -0,01001844 |
| Fabaceae    | -0,16807942 | 0,48424149  | 0,10359943  | -0,26150367 |
| Acacia      | 0,22156658  | -0,16412401 | 0,60366434  | 0,31932898  |
| Celtis      | -0,38888125 | -0,36804163 | -0,14701166 | -0,18325647 |
| Musa        | 0,32080094  | 0,15649144  | -0,48422134 | 0,1662213   |
| Asteraceae  | -0,45057939 | 0,07719821  | -0,05229205 | 0,16184734  |
| Poaceae     | -0,04447815 | -0,51232334 | -0,15074639 | -0,53393599 |

Variable la plus corrélée à un axe

Variable la plus anticorrélée à un axe

Cas 1 : toutes les variables (taxons) observées plus de 5 fois dans la carotte, à l'exception des taxons de marécages et de littoral/mangrove

Cas 2 : variables du cas 1 sans les taxons de la forêt secondaire

Cas 3 : variables du cas 2 sans Syzygium et Veitchia, taxons très corrélés ou anticorrélés à l'un des trois premiers axes du cas 2

Le biplot révèle que l'analyse statistique ne prend pas toujours en compte les taxons dont la variations est lié à un effet local. Ainsi, pour le calcul des tableaux de corrélations variables-facteurs, les taxons côtiers (littoral et mangrove), ainsi que les taxons de marécages, dont le développement est associé à la fermeture du marais, ne sont pas intégré dans le calcul.

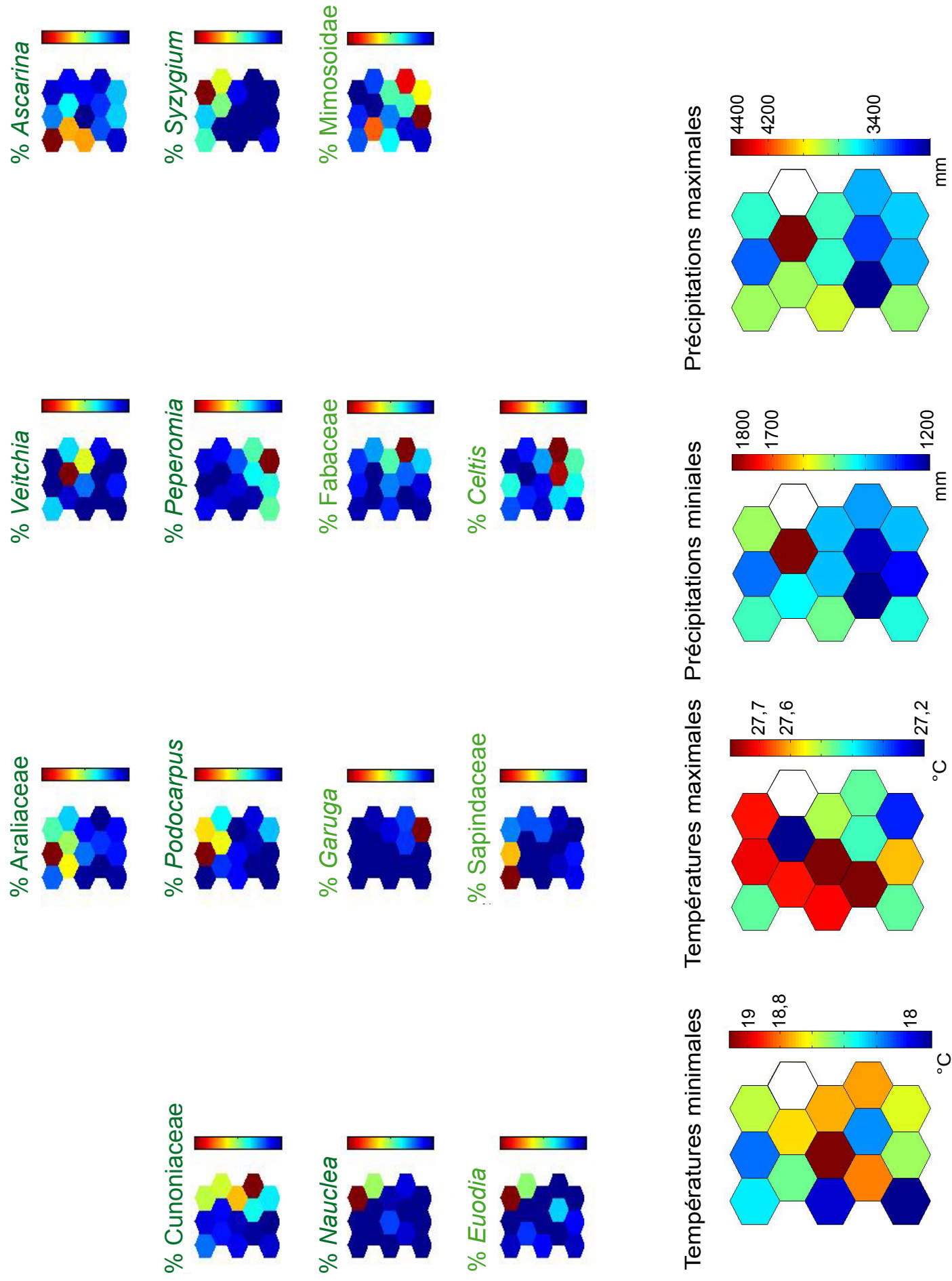


## Annexe 9 : Espaces climatiques des taxons les plus fréquemment rencontrés dans les échantillons du marais d'Emaotfer

| <b>Taxons</b>             | <b>Limites climatiques (températures moyennes et précipitations annuelles)</b> | <b>Données écologiques (d'après l'Herbier de Paris)</b>                                                          |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forêt humide</b>       |                                                                                |                                                                                                                  |
| <i>Meryta</i>             | 20-27°C, 1500-4500 mm                                                          | De 50 à 700 m d'altitude, dans la forêt humide sur sol calcaire ou volcanique                                    |
| <i>Schefflera</i>         | 18-28°C, 1600-4500 mm                                                          | De 200 à 1700 m d'altitude (Santo), commun dans la forêt humide, sur les crêtes                                  |
| <i>Veitchia</i>           | 23-27°C, 2000-5000 mm                                                          | Forêt humide sur calcaire récifal                                                                                |
| <i>Ascarina</i>           | 17-28°C, 2000-5000 mm                                                          | Forêt de montagne (de 350 m à Aneityum et jusqu'à 1500 m à Santo) à Cunoniaceae et <i>Metrosideros</i>           |
| <i>Geissois</i>           | 16-28°C, 2000-4000 mm                                                          | Forêt de montagne (de 200 m à 1100 m à Santo) avec une canopée de faible hauteur (max 6 m)                       |
| <i>Weinmania</i>          | 17-26°C, 2000-5000 mm                                                          | Forêt de montagne, sur les crêtes (de 30 m à Aneityum à 1800 m à Santo), à <i>Metrosideros</i> , sur un sol brun |
| <i>Podocarpus</i>         | 20-27°C, 2000-4000 mm                                                          | Forêt humide, jusqu'à 800 m sur Santo, sol noir forestier                                                        |
| <i>Syzygium</i>           | 18-25°C, 1500-3000 mm                                                          | De 50 à 1150 m d'altitude, dans la forêt humide                                                                  |
| <i>Nauclea</i>            | 24-30°C, 1600-3000 mm                                                          | Forêt humide sur sol noir forestier, jusqu'à 500 m d'altitude                                                    |
| <i>Peperomia</i>          | 18-27°C, 2000-5000 mm                                                          | Une épiphyte de la forêt humide jusqu'à 1350 m (Santo)                                                           |
| <b>Forêt semi-décidue</b> |                                                                                |                                                                                                                  |
| <i>Acacia</i>             | 19-28°C, 750-2500 mm                                                           | Forêt semi-décidue, jusqu'à 400 m d'altitude, sur sol argileux                                                   |
| <i>Derris</i>             | 19-27°C, 900-2000 mm                                                           | Forêt semi-décidue, liane plutôt proche du bord de mer                                                           |
| <i>Desmodium</i>          | 17-27°C, 1000-2500 mm                                                          | Forêt semi-décidue, du niveau de la mer à 1130 m (Santo) parfois sur sol karstique                               |
| <i>Pterocarpus</i>        | 18-27°C, 900-2200 mm                                                           | Forêt semi-décidue, proche du niveau de la mer, parfois forêt ripisylve                                          |
| <i>Euodia</i>             | 16-28°C, 750-2500 mm                                                           | Du niveau de la mer à 900 m d'altitude, forêt semi-décidue sur sol calcaire                                      |
| <i>Celtis</i>             | 20-27°C, 500 à 2000 mm                                                         | Forêt semi-décidue de basse altitude (maximum 200 m)                                                             |
| <i>Elattostachys</i>      | 17-29°C, 900-2500 mm                                                           | Du niveau de la mer jusqu'à 700, forêt semi-décidue                                                              |
| <b>Forêt secondaire</b>   |                                                                                |                                                                                                                  |
| <i>Elaeocarpus</i>        | 17-27°C, 1000-3000 mm                                                          | Végétation dégradée, du niveau de la mer (nord et centre de l'archipel) à                                        |

|                                              |                         |                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Elaeocarpus</i>                           | 17-27°C, 1000-3000 mm   | Végétation dégradée, du niveau de la mer (nord et centre de l'archipel) à 600 m (Aneitym)                                                            |
| <i>Acalypha</i>                              | 20-27°C, 900-3000 mm    | Végétation dégradée, du niveau de la mer à 400 m, envahit les jachères, souvent proche des villages, en lisière de forêt dense, sur plateau calcaire |
| <i>Homalanthus</i>                           | 19-27°C, 1000-3500 mm   | Végétation dégradée, du bord de mer à 600 m, supporte les sols sableux                                                                               |
| <i>Macaranga</i>                             | 16-28 °C, 800 à 2000 mm | Végétation dégradée, arbuste pionnier, envahit les jachères, souvent proche des villages,                                                            |
| Moraceae ( <i>Ficus</i> et <i>Malaisia</i> ) | 26-31°C, 900-2000 mm    | Végétation dégradée déjà recolonisée par des plantes pionnières, forêt humide secondaire de basse altitude, souvent proche des villages              |
| <i>Macropiper</i>                            | 17-27°C, 900-4000 mm    | Végétation dégradée, de la forêt humide de haute altitude (1830 m à Santo) à l'arrière plage (Efate), sur tout types de sols                         |
| <i>Piper</i>                                 | 21-26°C, 1500-5000 mm   | Mêmes remarques que pour <i>Macropiper</i>                                                                                                           |
| <i>Trema</i>                                 | 19-27°C, 1000 à 3000 mm | Végétation dégradée, du niveau de la mer jusqu'en moyenne altitude (650 m)                                                                           |
| Urticaceae ( <i>Dendrocnide</i> et           | 17-27°C, 900-3500 mm    | Végétation dégradée, du bord de mer à 600 m d'altitude (Tanna), commun dans les forêts secondaires, souvent en forêt ripisylve                       |

# Annexe 10 : Cartes Topologiques Auto-Organisatrices pour la carotte Tfer06



## Annexe 10 : Cartes Topologiques Auto-Organisatrices pour la carotte Tfer06 (suite)

% Euphorbiaceae



% Moraceae



%(Macro)Piper



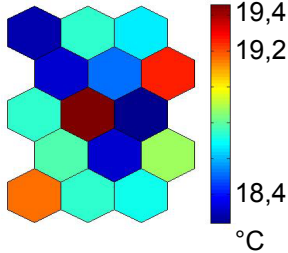
% Trema



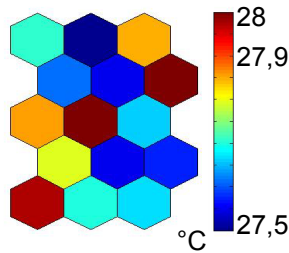
% Urticaceae



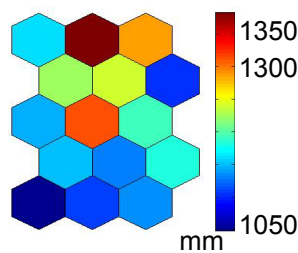
Températures minimales



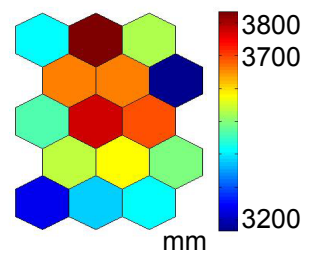
Températures maximales



Précipitations minimales



Précipitations maximales



### Interprétation

Chaque carte est composée par un ensemble de polygones, représentant une classe. Ces classes sont réalisées en regroupant les pourcentages similaires des taxons au cours du temps : un polygone bleu représente un période où le taxon est présent en faible pourcentage, un rouge lorsqu'il est présent en important pourcentage.

L'ensemble des polygones présents à un même endroit (par exemple en haut à gauche) sur toutes les cartes correspond à l'ensemble des taxons présents à une période. Le logiciel relie cette période à des conditions de températures et de précipitations minimum/maximum, calculé par les fonctions de densité de probabilité.

On obtient ainsi des cartes pour les précipitations et les pluies minimum et maximum. De la même manière qu'avec les cartes de pourcentages, les températures/les précipitations les plus basses sont en bleu, les plus importantes en rouge.

En associant les polygones correspondant aux plus fortes proportions d'un taxon sur sa carte topologique avec les polygones situés au même endroit sur la carte topologique d'une donnée météorologique, nous identifions les conditions de températures et de précipitations minimum et maximum pour ce taxon.

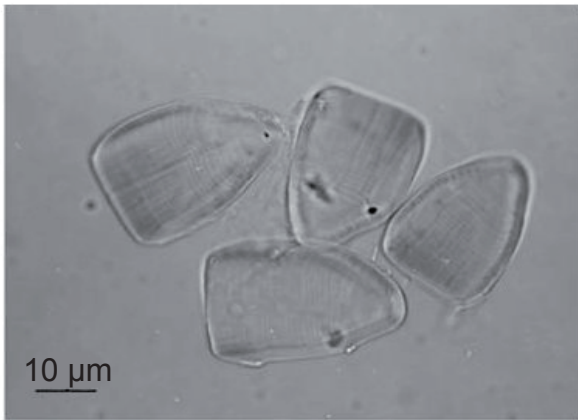
Les taxons de forêt secondaire sont très importants et très fluctuants, leur cartes topologiques ont été calculées séparément des autres taxons.

Par exemple, les conditions de températures et de précipitations des Araliaceae sont ainsi comprises entre 18-18,4 et 27,2-27,6°C et entre 1300-1500 et 3500-3700 mm/an.

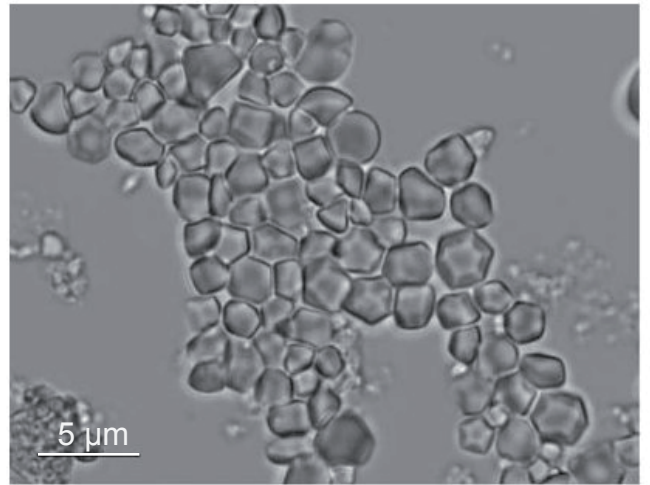
Les conditions de températures et de précipitations des Mimosoidae sont comprises entre 18,4-18,8 et 27,2-27,4°C et entre 1200-1300 et 3400-3500 mm/an

## Annexe 11 : Phytolithes et grains d'amidon frais

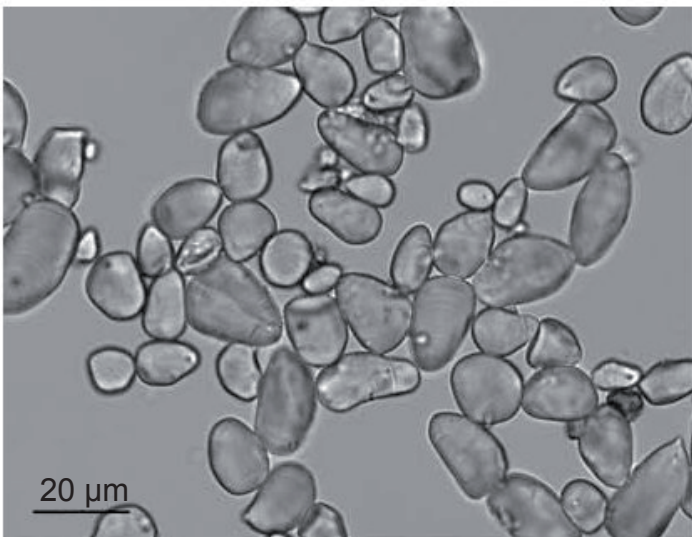
### Grains d'amidon (Lentfer, 2009)



*Dioscorea* sp.



*Colocasia* sp.



*Musa* sp.

### Phytolithes (collection de référence IRD France Nord - Bondy)



*Musa* sp.

Annexe 12 : Photos des mousses 1, 2, sous-bois et de la végétation environnante des mousses



Mousse 1



Mousse 2



Végétation à proximité des Mousses 1 et 2



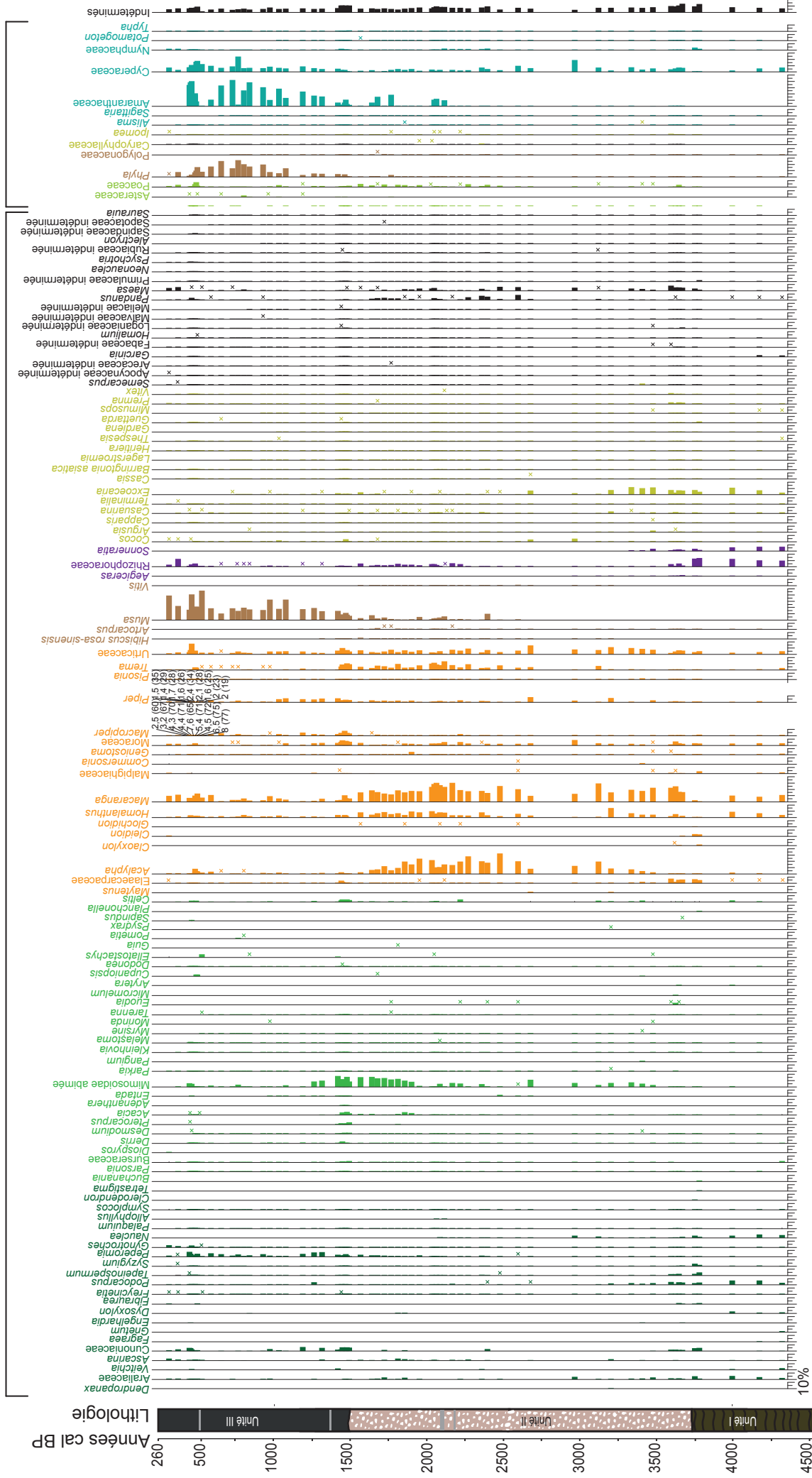
Végétation à proximité de la Mousse du sous-bois



# Annexe 13A : Diagramme détaillé de la carotte Tfer06

## Arboreal Pollen (AP)

## Non Arboreal Pollen (NAP)

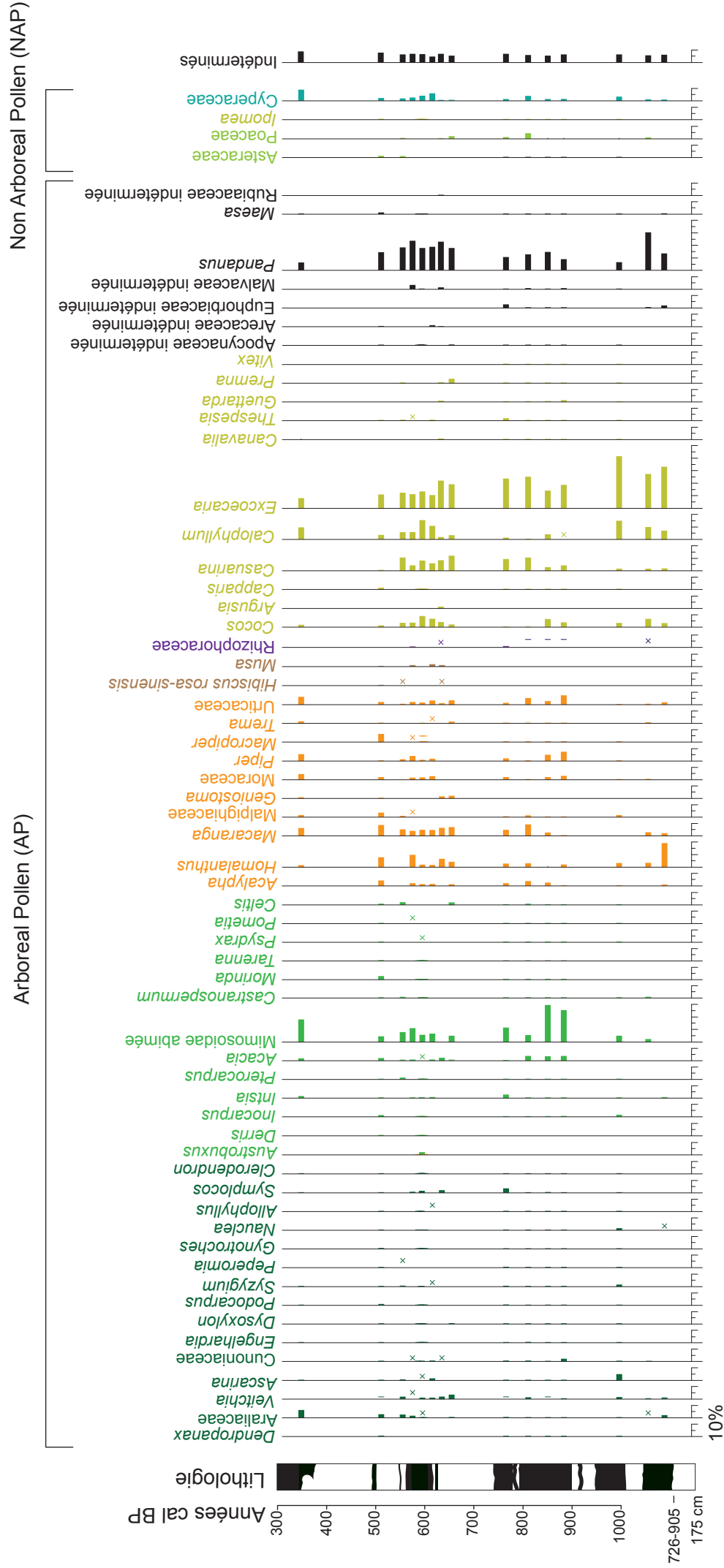


**Forêt tropicale humide** Herbacées heliophiles  
**Forêt semi-décidue** Marécage  
**Forêt secondaire**  
**Taxons introduits**  
**Mangrove**  
**Littoral**  
**Ubiquistes** Téphas —

**Araliaceae : Meryta et Schefflera**  
**Cunoniaceae : Geissois et Weinmania**  
**Burseraceae : Canarium et Garuga**  
**Elaeocarpaceae : Aceratum et Elaeocarpus**  
**Moraceae : Ficus et Malaisia**  
**Urticaceae : Dendrocnide et Pipturus**  
**Rhizophoraceae : Ceriops, Rhizophora et Brugiera (rare)**

**Piper et Macropiper : sur-abondance entre 530 et 440 BP**  
**Le premier chiffre indique le nombre de grains de Piper et Macropiper comptés (en milliers de grains) et celui entre parenthèses le pourcentage sur la somme totale**  
**X : Pourcentage < 0,5 %**

# Annexe 13B : Diagramme détaillé de la carotte Ota2



Forêt tropicale humide  
 Forêt semi-décidue  
 Forêt secondaire  
 Taxons introduits  
 Mangrove  
 Littoral  
 Ubiquistes

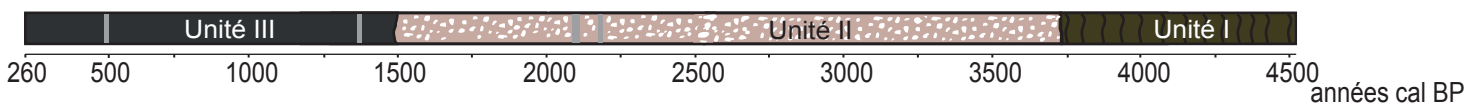
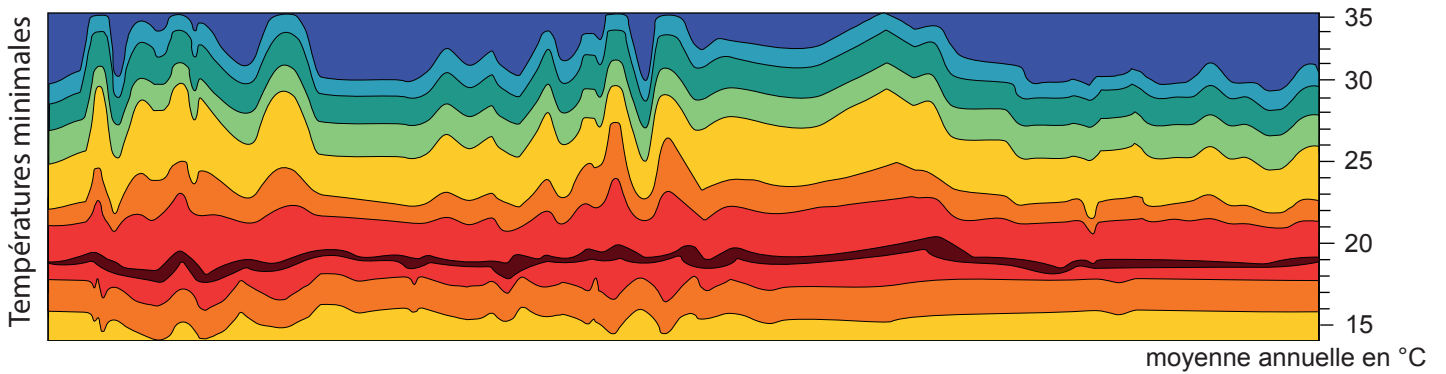
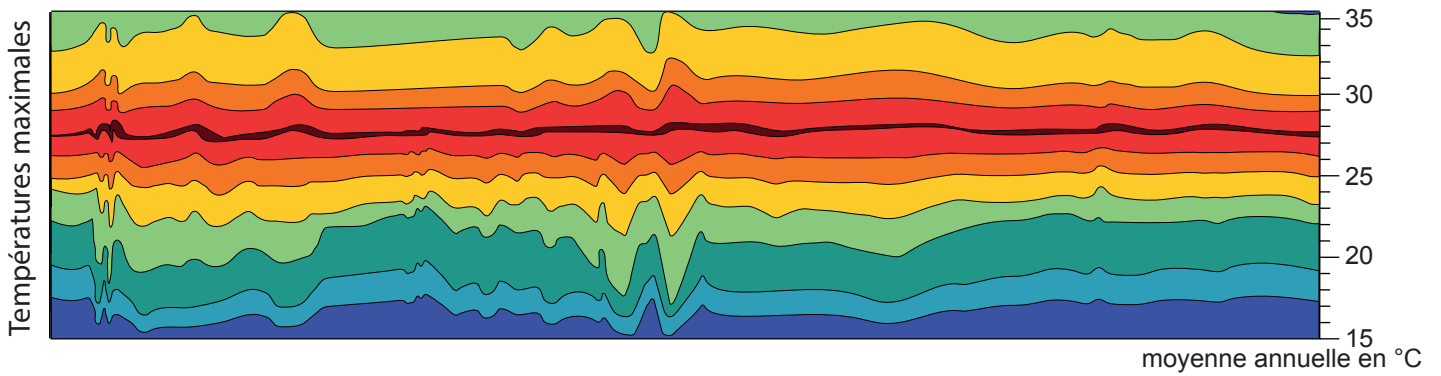
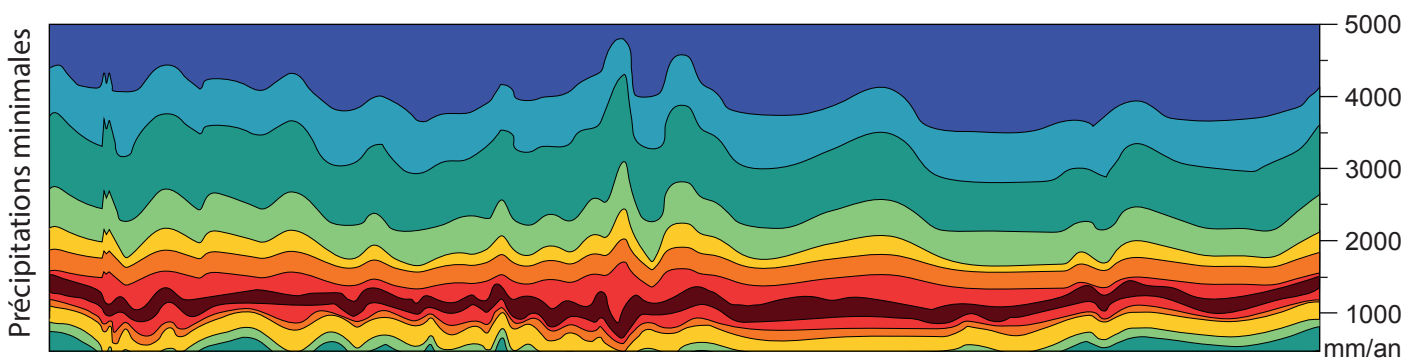
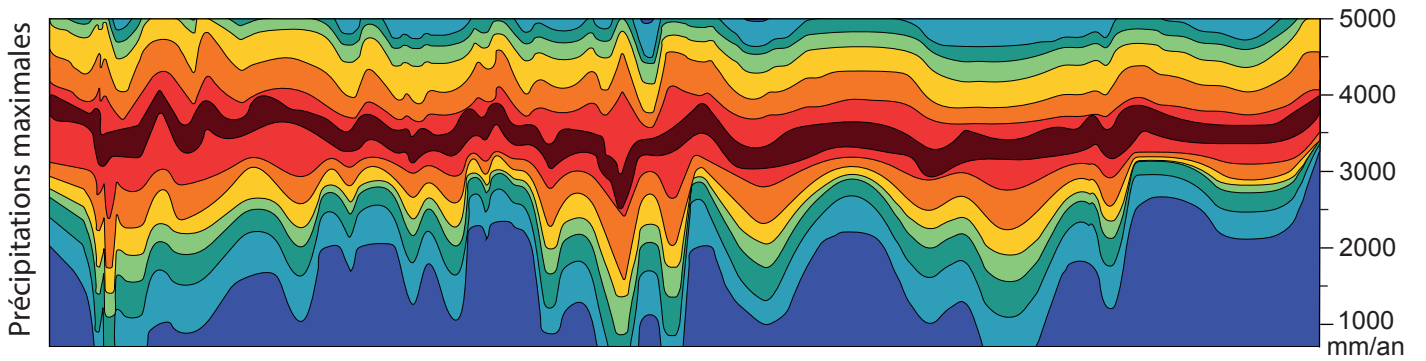
Herbacées héliophiles  
 Marécage

Araliaceae : *Meryta* et *Schefflera*  
 Cunoniaceae : *Geissois* et *Weinmania*  
 Moraceae : *Ficus* et *Malaisia*  
 Urticaceae : *Dendrocnide* et *Pipturus*  
 Rhizophoraceae : *Cerriops* et *Rhizophora*

x : Pourcentage < 0,5 %

Annexe 15 : Quantifications climatiques de la séquence pollinique du marais d'Emaotfer. Les taxons de la forêt secondaire sont inclus dans le calcul

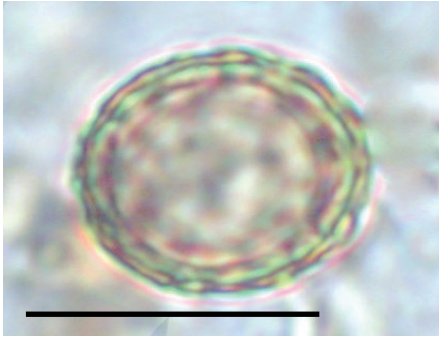
|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | B | A | 3 | B | A | B | A |
| 4 |   |   |   | 2 |   |   | 1 |



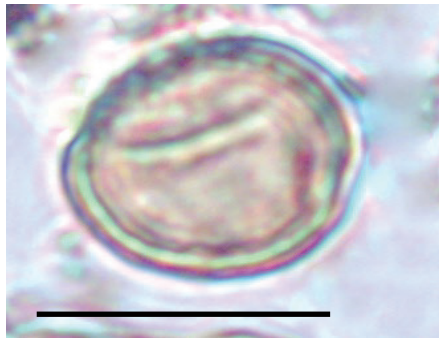
Densité de probabilité (unités relatives)

Photos pollen fossile - Plantes introduites retrouvées à Efate

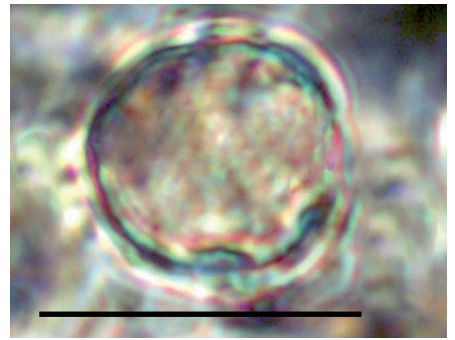
Les Piperaceae



*Macropiper* sp.

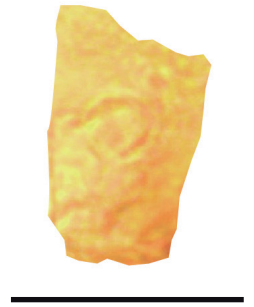
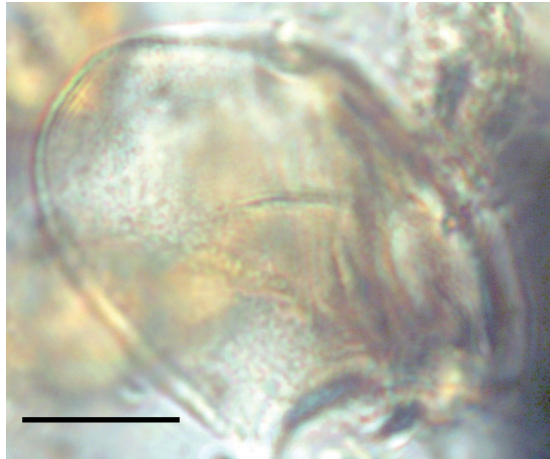


*Piper* sp.

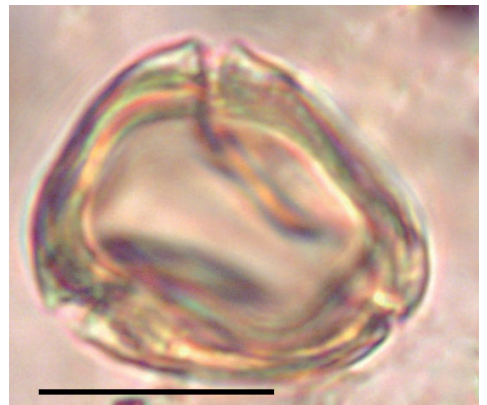
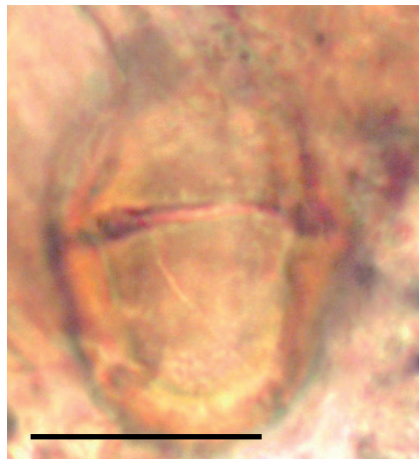
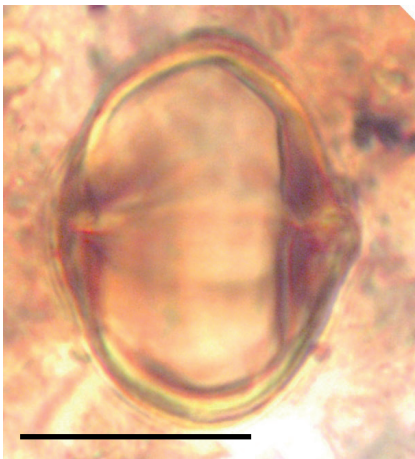


*Piper methysticum*

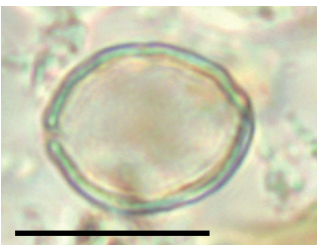
*Musa* sp. (pollen et phytolithes)



*Phyllanthus nodiflora*



*Artocarpus* sp. (plus rare)



Taille du trait : 15  $\mu$ m

## Compte-rendu du congrès APLE-APLF 2013

17-20/09 2013, Madrid (Espagne)

Claire Combettes, doctorante MNHN (subvention APLF 2013)

Le congrès APLE/APLF, organisé par le CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) et le UCM (Universidad Complutense de Madrid) s'est déroulé à Madrid (Espagne) du 17 au 20 septembre 2013. De nombreuses thématiques ont été abordées : paléoenvironnement/paléoclimat, paléocéanographie, mellissopalynologie, allergologie, interaction Homme-environnement, génétique, etc.

Ma propre participation s'est inscrite dans la session "landscape change and human-environment interactions".

Les études présentées ici portaient sur des séquences datées du Pléistocène moyen jusqu'au Moyen-Age. La palynologie fait partie intégrante d'une étude archéologique, en permettant de mieux cerner les relations homme-environnement-climat : les migrations humaines pouvant en effet être liées à des changements environnementaux ou climatiques, et la pression anthropique pouvant être à l'origine de modifications de la végétation. Ces relations nous sont apparues complexes, et loin d'être complètement comprises. Il n'est pas toujours évident de connaître l'origine d'un changement dans le signal pollinique : s'agit-il d'une activité anthropique, d'un événement naturel ou d'une combinaison de plusieurs facteurs ? Et à quel point l'Homme est influencé par des événements naturels ? Ainsi, des résultats concernant les migrations humaines, et surtout l'installation de l'Homme et la mise en place de l'agriculture et de l'élevage ont été présentés. La vulnérabilité de la végétation face à la pression anthropique présente et future a aussi été abordée.

Il est aussi indispensable de combiner d'autres analyses de proxies (comme les NPP ou les macro-restes) aux résultats palynologiques et aux données archéologiques afin d'obtenir des résultats plus complets, et c'est ce que nous a rappelé la conférence de S. Riera Mora en début de session. Enfin, l'utilisation de modèles peut s'avérer intéressant, en apportant des données différentes de celles obtenues par des analyses palynologiques.

Le symposium a été clôturé par une conférence plénière donnée par Donatella Magri, et portait sur les disparitions des taxons d'arbres en Europe durant les deux derniers millions d'années. Cette communication, particulièrement intéressante, a permis de mettre en évidence le comportement de certains taxons dont la distribution se serait réduite, voire qui auraient disparu, d'abord en région méditerranéennes. Ces résultats sont inattendus, et ont été à l'origine de beaucoup de questions.

En déterminant les territoires avec un fort taux d'extinction et de conservation des espèces, et en décrivant le processus de déclin des populations d'arbres, ce genre d'étude peut constituer une aide à la mise en place de programmes de conservation de la biodiversité.

C'est avec un grand plaisir que j'ai participé à ce congrès, qui m'a permis de rencontrer d'autres chercheurs et doctorants. Ce symposium fut pour moi l'occasion de présenter pour la première fois (comme pour d'autres doctorants) mes résultats et d'en discuter avec des palynologues.

## Compte-rendu du congrès INQUA 2015

26/07-02/08 2015, Nagoya (Japon)

Claire Combettes, doctorante MNHN (subvention AFEQ 2015)

J'ai eu la chance de participer au XIX<sup>ème</sup> colloque international INQUA, *Quaternary Perspectives on Climate Change, Natural Hazards and Civilization*. Plus de 1800 participants de 70 pays se sont réunis autour de thématiques mettant en avant l'importance des sciences du Quaternaire dans la compréhension des climats, des environnements futurs et de leurs relations avec l'Homme.

Ma communication s'est inscrite dans la session "Identifying human activity in palaeoecological records". De nombreuses présentations y ont abordé les relations entre l'Homme et son environnement naturel en différents points de la planète, à l'aide de données palynologiques, anthracologiques, climatiques et archéologiques. La communication de B.A.S. Davis (Suisse) a fait le point sur les méthodes permettant de déterminer l'origine naturelle ou anthropique d'un milieu. Les bases de données polliniques et les modèles land-use/land-cover constituent une avancée dans ce domaine, bien que l'identification des déforestations à grande échelle reste complexe, tant l'influence des activités humaines est variable d'un endroit à un autre.

La communication de B.S. Whitney (Grande-Bretagne) a posé la question de la représentativité des enregistrements polliniques dans les réservoirs (lac, marais) de taille importante. Il a ainsi été proposé un modèle permettant de déterminer la sensibilité des enregistrements issus de grands lacs à l'impact des activités humaines sur la végétation.

Une session que j'ai suivi avec beaucoup d'intérêt s'intitulait "Diversification of flora since the late Pliocene". Les études présentées, souvent en lien avec la palynologie, nous ont montré l'importance des changements de la dynamique de la végétation passée dans la distribution de la flore actuelle.

L'analyse de la distribution des taxons reliques du Tertiaire, exposée par Z.K. Zhou (Chine), a mis en évidence l'influence du cycle saisonnier et des moussons sur le développement de tels taxons, tandis qu'elle a minimisé l'effet des périodes glaciaires, événements pourtant souvent suggérés comme à l'origine de disparitions de taxons tropicaux dans les zones tempérées. Une autre communication, par A. Ito (Japon), a illustré l'origine d'une espèce endémique du Japon, *Fagus crenata*. L'étude des feuilles et des cupules de *Fagus* de Chine et du Japon, datant de 9.7 Ma jusqu'à aujourd'hui, a permis de relier l'apparition des caractères typiques de *Fagus crenata* à des événements climatiques et géologiques.

L'ensemble des présentations de la session "Climate change in the tropical south Pacific during the Late Quaternary" a mis en avant des observations et des modèles permettant de mieux comprendre les relations océan-atmosphère de cette région du globe. Dans cette session, les variations d'ENSO ou les périodes d'expansions des zones d'upwelling du Pacifique équatorial ont pu être reconstitués à l'aide d'un grand nombre de proxies, comme les isotopes du bore, ou la concentration en carbone et en titane.

La communication de C. Karamperidou (États-Unis) a concerné la question très controversée d'une variabilité de ENSO à l'Holocène moyen. Il en ressort la nécessité de prendre en compte la réponse d'ENSO au forçage orbital, afin de comprendre les variations entre les proxies issus du Pacifique central et du Pacifique est.

Cette participation me fut profitable tant par les communications que j'ai pu suivre que par les discussions. Il est aussi indispensable de saluer l'organisation efficace d'un tel congrès, malgré le nombre important de participants. C'est avec une grande attention que je suivrais les publications qui pourront sortir à la suite de ce colloque.

