



**HAL**  
open science

# Étude palynologique à haute résolution d'une courte séquence sédimentaire contemporaine du premier peuplement de l'île d'Efaté (Vanuatu) vers 3500 BP

Claire Combettes

► **To cite this version:**

Claire Combettes. Étude palynologique à haute résolution d'une courte séquence sédimentaire contemporaine du premier peuplement de l'île d'Efaté (Vanuatu) vers 3500 BP. *Archéologie et Préhistoire*. 2012. dumas-00742744

**HAL Id: dumas-00742744**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00742744>**

Submitted on 18 Oct 2012

**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.

COMBETTES Claire

*Mémoire de M2 Quaternaire et Préhistoire (QP)*

**Etude palynologique à haute résolution d'une  
courte séquence sédimentaire contemporaine du  
premier peuplement de l'île d'Efaté (Vanuatu)  
vers 3500 ans BP**



Site internet Santo  
2006



Poster Sémah, Wirmann, 2007



Terra Australis  
n°26, 2007

---

## *Remerciements*

---

Je tiens tout d'abord à remercier Anne-Marie Sémah. Je lui suis très reconnaissante de l'attention qu'elle m'a portée au cours de ces cinq derniers mois. Sa disponibilité, son soutien et ses conseils avisés m'ont beaucoup aidée lors de ce stage.

Je remercie tous les membres de l'équipe Paléoproxus pour leur chaleureux accueil et leur aide. En particulier Denis Wirrmann, pour m'avoir apporté plusieurs articles et pour avoir partagé ses connaissances.

Je remercie François Sémah et Denis Vialou, mes responsables de master Quaternaire et Préhistoire, pour leur participation à ma formation à travers leur enseignement.

Merci à toute la promotion de M2 QP, pour avoir rendu ces mois de stage plus agréable, pour l'entraide, pour le soutien et bien sur aussi les moments de détente. Je remercie en particulier Lisa, Sophie, Marie et Akiyo.

Merci à Maé pour nos longues discussions au téléphone et pour son appui. Merci à Clément pour son aide à la rédaction de ce mémoire, et à mes parents pour m'avoir toujours laissé libre de mes choix. Merci enfin à Guillaume pour tout.

---

## Résumé

---

La carotte sédimentaire Tfer06, prélevée dans le marais d'Emaotfer (île d'Efaté, Vanuatu), est un matériel privilégié pour la recherche de nouvelles informations concernant les variations paléoclimatiques et paléoenvironnementales du Pacifique Sud-Ouest. Nous avons effectué une analyse palynologique à haute résolution à partir de sédiments datés aux alentours de 3500-3000 ans B.P. Il s'agit d'une période charnière pour la géologie, avec le déclenchement d'une surrection affectant l'île d'Efaté, comme pour la paléoclimatologie, avec le renforcement du phénomène El Niño, ainsi que pour l'archéologie, avec la colonisation des îles mélanésiennes par l'Homme. Huit échantillons, prélevés tous les centimètres, ont ainsi été préparés et montés sur des lames, afin de procéder au comptage des grains de pollen et des spores. Les résultats, exprimés en pourcentage, sont représentés sous la forme de deux diagrammes. Le premier diagramme répertorie l'évolution de tous les taxons déterminés dans les échantillons, le second représente l'évolution des cinq principales associations végétales regroupant ces taxons par préférence écologique. L'interprétation de ces diagrammes révèle le passage d'un climat chaud et humide à un climat relativement plus sec, ainsi qu'un retrait du rivage. Ce changement climatique peut être corrélé à la période de renforcement d'El Niño, tandis que l'abaissement du niveau marin semble lié aux mouvements tectoniques de la région. Dans les sédiments les plus récents, quelques traces indirectes d'activités anthropiques (perturbation de la végétation) ont peut être été détectées. Ces traces pourraient être reliées au cimetière archéologique de Téouma (daté de 3000ans B.P.), localisé à proximité du marais d'Emaotfer. Au niveau de l'échantillon le plus récent, un retour à un climat plus humide est observé. Ce revirement peut être interprété comme une simple hausse d'humidité avant une recrudescence de la sécheresse, ou à une nouvelle évolution vers un climat plus humide.

Mots clés : pollen, climat, Vanuatu, Lapita, migration mélanésienne, El Niño

## *Table des matières*

INTRODUCTION -----	6
--------------------	---

### I – Présentation du site

<b>1 – L’île d’Efaté</b> -----	9
1.1 – Contexte géographique et géologique -----	10
1.2 – Le climat -----	11
1.3 – La flore -----	11
1.4 – L’archéologie -----	11
<b>2 – L’échantillonnage</b> -----	12
2.1 – Méthode d’échantillonnage -----	12
2.1.1 – Sur le terrain -----	12
2.1.2 – Au laboratoire -----	12
2.2 – Description de la carotte Tfer06 -----	13
2.3 – Choix des échantillons -----	14

### II – Méthodes utilisées

<b>1 – Extraction de grains de pollen fossiles</b> -----	15
1.1 – Échantillons -----	15
1.2 – Traitement chimique -----	15
<b>2 – Extraction de grains de pollen frais</b> -----	16
2.1 – Objectif du traitement -----	16
2.2 – Traitement chimique -----	16

### III – Étude des échantillons

<b>1 – Nomenclature et identification d’un pollen</b> -----	17
1.1 – Définition d’un grain de pollen -----	17
1.2 – Détermination d’un grain de pollen -----	17
1.2.1 – Forme générale d’un grain de pollen -----	17
1.2.2. – L’exine -----	18
1.2.3 – Les apertures -----	19
1.3 – Problèmes rencontrés lors des déterminations -----	19
1.3.1 – Flore mal connue -----	19
1.3.2 – Grain de pollen semblables -----	19
1.3.3 – Rapport pluie pollinique et végétation -----	20
1.3.4 – Fragilité de certains grains de pollen -----	20
1.4 – Les associations végétales au Vanuatu -----	20
<b>2 – Richesse des échantillons</b> -----	22
<b>3 – Datations</b> -----	22
<b>4 – Description des diagrammes polliniques</b> -----	24
4.1 – Construction d’un diagramme -----	24
4.2 – Description du diagramme pollinique complet -----	24

4.3 – Description du diagramme d’association végétale -----	28
---	----

#### IV – Interprétation des diagrammes

<b>1 – De 433 à 432 cm de profondeur -----</b>	<b>31</b>
<b>2 – De 432 à 431 cm de profondeur -----</b>	<b>31</b>
<b>3 – De 431 à 429 cm de profondeur -----</b>	<b>32</b>
<b>4 – De 429 à 428 cm de profondeur -----</b>	<b>33</b>
<b>5 – De 428 à 427 cm de profondeur -----</b>	<b>34</b>
<b>6 – De 427 à 426 cm de profondeur -----</b>	<b>34</b>
<b>7 – De 426 à 425 cm de profondeur -----</b>	<b>35</b>

CONCLUSION -----	36
------------------	----

Bibliographie -----	37
---------------------	----

Annexes -----	41
---------------	----

## Introduction

L'étude des climats et des paléoenvironnements est basée sur une variabilité d'indicateurs, comme l'étude des carottes de glaces, des sédiments marins ou lacustres, les grains de pollen ou encore d'autres biomarqueurs (mammifères, mollusques, insectes, charbons de bois, etc.).

Les informations fournies par les études palynologiques permettent de reconstituer les environnements à l'échelle régionale, mais présentent aussi un intérêt pour la préhistoire, puisqu'en plus de connaître l'évolution de la végétation d'un milieu proche de l'Homme (corrélables avec les changements de climat), elles permettent de renseigner sur l'impact des activités anthropiques sur la végétation. Associées à d'autres disciplines comme la paléanthropologie, l'archéozoologie, les analyses isotopiques, etc. les études palynologiques sont également utiles pour reconstituer les grandes lignes du peuplement humain (par exemple, Anderson *et al*, 2006 ; Bentley *et al*, 2007 ; Sémah et Déroit, 2006 ; Valentin *et al*, 2009), les migrations étant souvent influencées par les variations climatiques.

Le Vanuatu, qui occupe une place importante dans la compréhension de l'histoire du peuplement du Pacifique, a été la région choisie pour cette étude (fig.1). Il s'agit d'un archipel mélanésien situé dans le Pacifique Sud-Ouest, au Nord de la Nouvelle-Calédonie. Cet archipel s'étend sur 800km, entre 13 et 16° de latitude S et 165 et 170° de longitude Est, sur un axe NNO-SSE, et possède une superficie de 13000 km<sup>2</sup>.

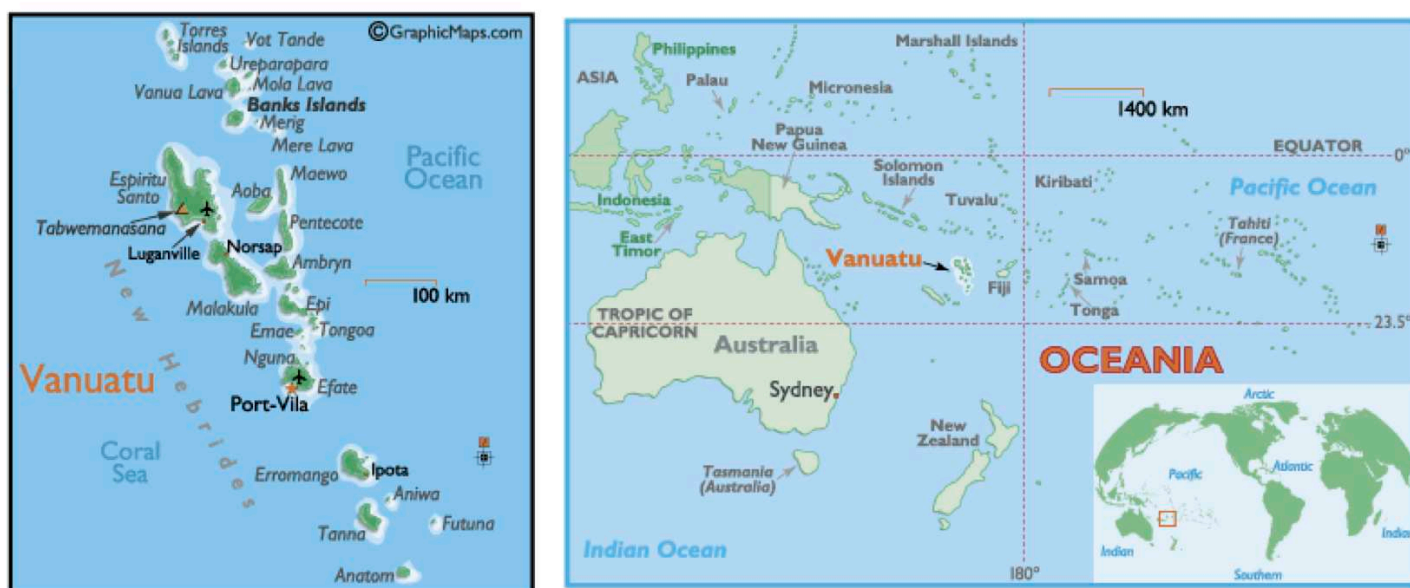


Fig.1 : Position géographique du Vanuatu (GraphicMaps.com modifié)

La tectonique de cette région est marquée par la convergence des plaques Australie et Pacifique. Ce phénomène se caractérise par une zone de déformation, composée par deux zones de subduction (Pelletier, B. 2009). Une de ces zones de subduction, appelée marge du Vanuatu, est associée à un arc insulaire où se situent les archipels Santa Cruz, Salomon et Vanuatu (fig.2). Ce dernier étant formé au cours de plusieurs épisodes volcaniques, les îles qui le composent ne sont pas identiques : certaines possèdent

encore des volcans en activité (exemple : Tanna ou Ambrym), les superficies et le relief des îles varient.

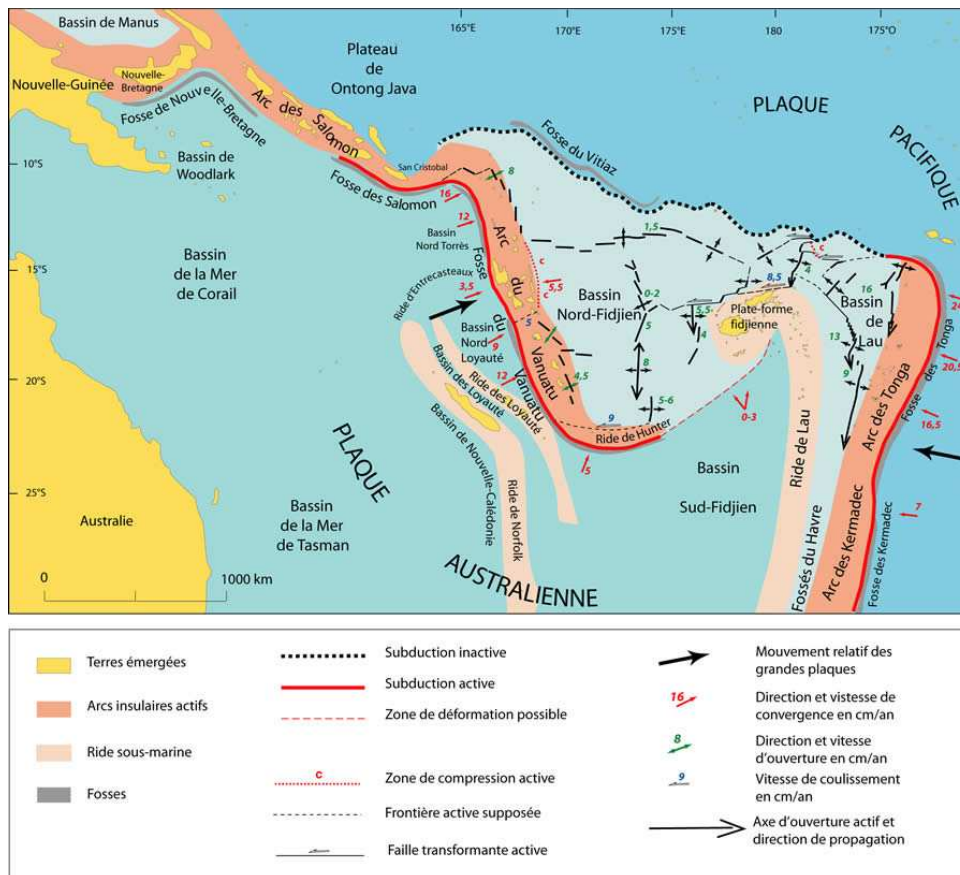


Fig.2 : Cadre structural du Vanuatu (in Pelletier, B. 2009)

L'archéologie préhistorique de cette région du Pacifique est caractérisée par la culture Lapita. Cette culture est associée aux populations parties des îles Bismarck, en Nouvelle-Guinée (plus ancien site Lapita datés de 3500 BP - Kirch, 1988), vers l'Océanie Lointaine (Est de la Mélanésie, Micronésie, Polynésie) (Kirch, 1997). Le Vanuatu possède une multitude de sites archéologiques Lapita, et le nombre de gisements fouillés augmente régulièrement. La particularité de cet archipel est de posséder le plus ancien cimetière Lapita, celui de Téouma (3200 - 3000 ans BP), et il s'agit du seul gisement, avec le site éponyme en Nouvelle-Calédonie, proche de Koné, à posséder des ossements humains et des poteries complètes (Bedford *et al*, 2006).

Placé dans une zone tectonique active, des soulèvements se produisent au niveau du Vanuatu, occasionnant des baisses du niveau marin depuis le Pléistocène supérieur (Mallick, 1975). De plus, vers 3000 ans BP, des événements El Niño (devenus dominants par rapport aux événements La Niña depuis 5000 ans B.P.) longs et récurrents dans le Pacifique central sont remarqués dans les enregistrements, provoquant sans doute une sécheresse assez importante (Donders *et al*, 2008 ; Numn, 1997 ; Tsonis, 2009). C'est à cette même période qu'est daté le cimetière Lapita.

La période de 3000 ans BP semble donc être une date charnière au niveau climatique, environnemental et archéologique. Ces phénomènes ont peut être favorisé la migration des Lapita sur les îles de Mélanésie.



Le but de ce travail est ainsi d'analyser, à haute résolution, le contenu pollinique au moment d'un changement sédimentaire important, daté de 3500 ans B.P. Les sédiments ont été prélevés dans un marais sur l'île d'Efaté. A l'aide de la reconstitution de l'environnement et du climat que nous allons obtenir, nous envisagerons la possibilité qu'il existe un lien entre les variations climatiques et l'arrivée des premiers hommes en Mélanésie.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à la présentation du site étudié, ainsi qu'à la description des méthodes d'échantillonnage, tandis que la partie deux exposera les méthodes d'extraction des grains de pollen frais et fossiles. La détermination des grains de pollen, les résultats, réunis dans un diagramme palynologique, ainsi que les problèmes rencontrés au cours de cette étude seront décrits dans la partie trois. Pour finir, ce diagramme sera commenté dans la partie quatre et les informations acquises sur les changements environnementaux et climatiques de 3500 ans B.P. seront développées.

# Présentation du site

## I – L'île d'Efaté

### 1.1 – Contexte géographique et géologique

L'île d'Efaté, où ont été prélevés les sédiments, est située dans la partie centrale de l'archipel du Vanuatu et localisée entre 168°10' -168°35' de longitude Est et 17°25' -17°50' de latitude Sud. Cette île possède des volcans sous marins actifs et est constituée en majorité par des roches volcaniques aplanies par l'érosion, produits d'éruption datant du Miocène supérieur à l'Holocène, et par des formations coralliennes récifales (Ash *et al*, 1978 – fig. 3). Cette île est formée par une surrection, à l'origine de grands bassins d'effondrement et de terrasses calcaires.

Les échantillons étudiés ont été prélevés dans le marais d'Emaotfer, sur la côte Sud de l'île d'Efaté. Ce marais est localisé sur une ancienne terrasse, près d'un grand bassin d'effondrement, le graben de Téouma (Ash *et al*, 1967). Ce marais a pu résulter d'une accumulation de silts provenant de la rivière de Téouma dans un petit fossé. Il couvre une surface d'environ 1.1 km<sup>2</sup> et possède une profondeur d'eau au maximum de 1m (Wirrmann *et al*, 2011 – fig.4). Il est situé à proximité du cimetière Lapita de Téouma.

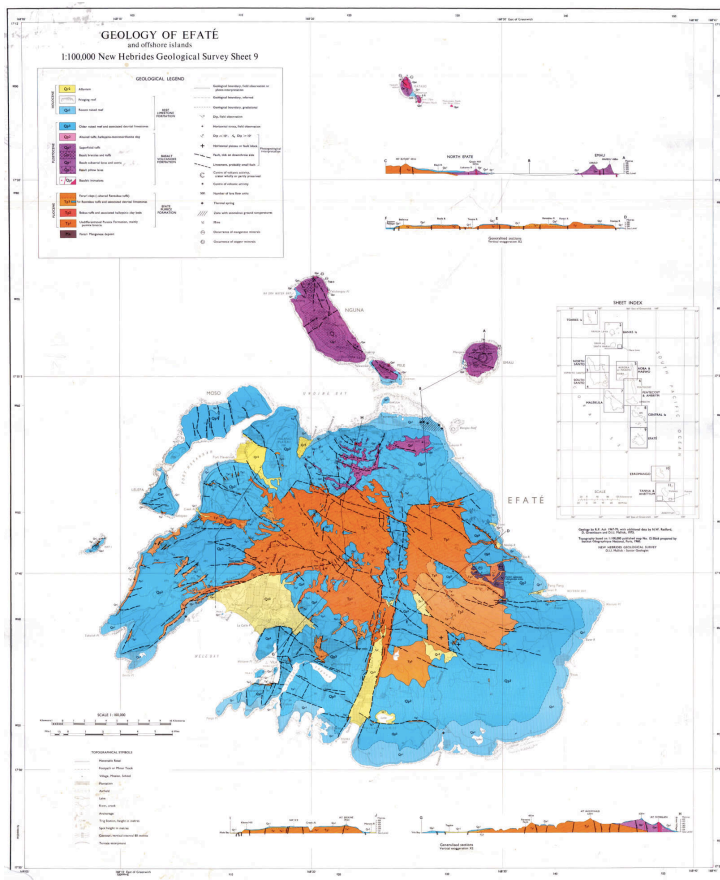


Fig.3 : Géologie de l'île d'Efaté ; les zones en bleu correspondent aux anciens récifs coralliens, les zones en orange et en violet à des roches volcaniques (Ash *et al*, 1967)

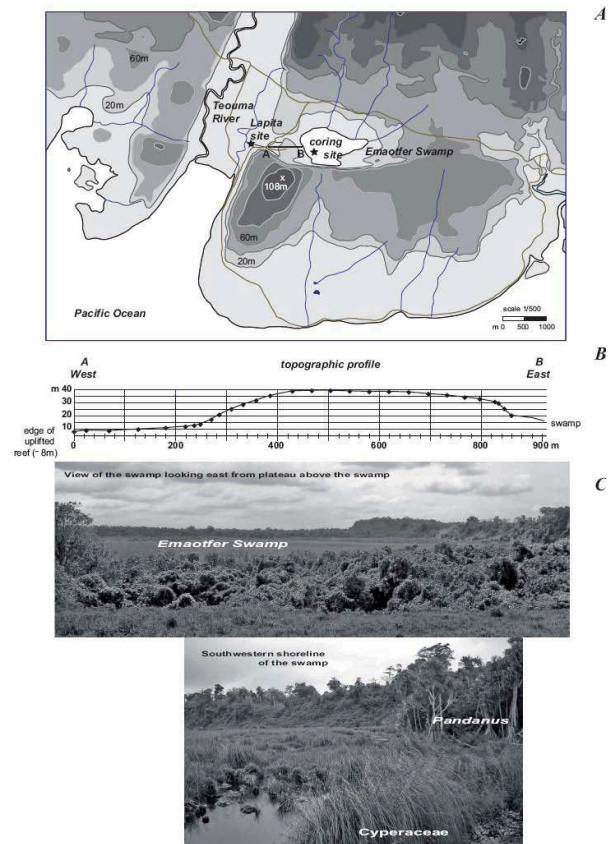


Fig.4 : A) Carte topographique de Teouma Bay, localisation géographique du marais d'Emaotfer et du site Lapita. B) Profil topographique le long de la ligne AB C) Vues de la rive Est de Emaotfer (en haut) et de la rive Sud-Ouest (en bas) (Wirrmann *et al*, 2011)

## 1.2 - Le climat

L'archipel est soumis à la zone de convergence Sud Pacifique (SPCZ) et subit donc d'importantes variations climatiques en une année, comme les cyclones ou le phénomène El Niño, aussi à l'origine de changements des vents et des courants marins (Wyrтки K., 1975).

En effet, il existe un déplacement de la masse atmosphérique entre l'Est et l'Ouest du Pacifique, appelée oscillation australe (Wyrтки K., 1973). Cette oscillation est à l'origine de modifications sur le couple océan - atmosphère.

Quand de hautes pressions sont présentes dans l'Est du Pacifique, les pressions sont plus faibles dans le Pacifique Ouest. Le gradient de pression entre l'Est et l'Ouest est donc important, et permet la circulation d'alizés d'Est en Ouest, ceux-ci à leur tour permettent la circulation d'un courant marin dans la même direction, créant un upwelling côtier le long de la côte Ouest de l'Amérique du Sud. Il y a donc une arrivée d'eau froide dans l'Est du Pacifique et une accumulation d'eau chaude dans l'Ouest. Cette eau chaude entraîne un climat humide au niveau des îles du Pacifique Ouest (Beucher, F *et al*, 2010 ; Wyrтки K., 1975). Mais, par intervalle irrégulier, le gradient de pression diminue, causant un ralentissement des alizés. La quasi absence de ceux-ci ne permet plus de circulation océanique d'Est en Ouest, et donc ne permet plus à l'upwelling de se produire. Les eaux chaudes, accompagnées de pluies, se déplacent vers le Pacifique central voire Est, rendant le climat du Pacifique Ouest relativement plus sec : c'est la situation El Niño (fig.5).

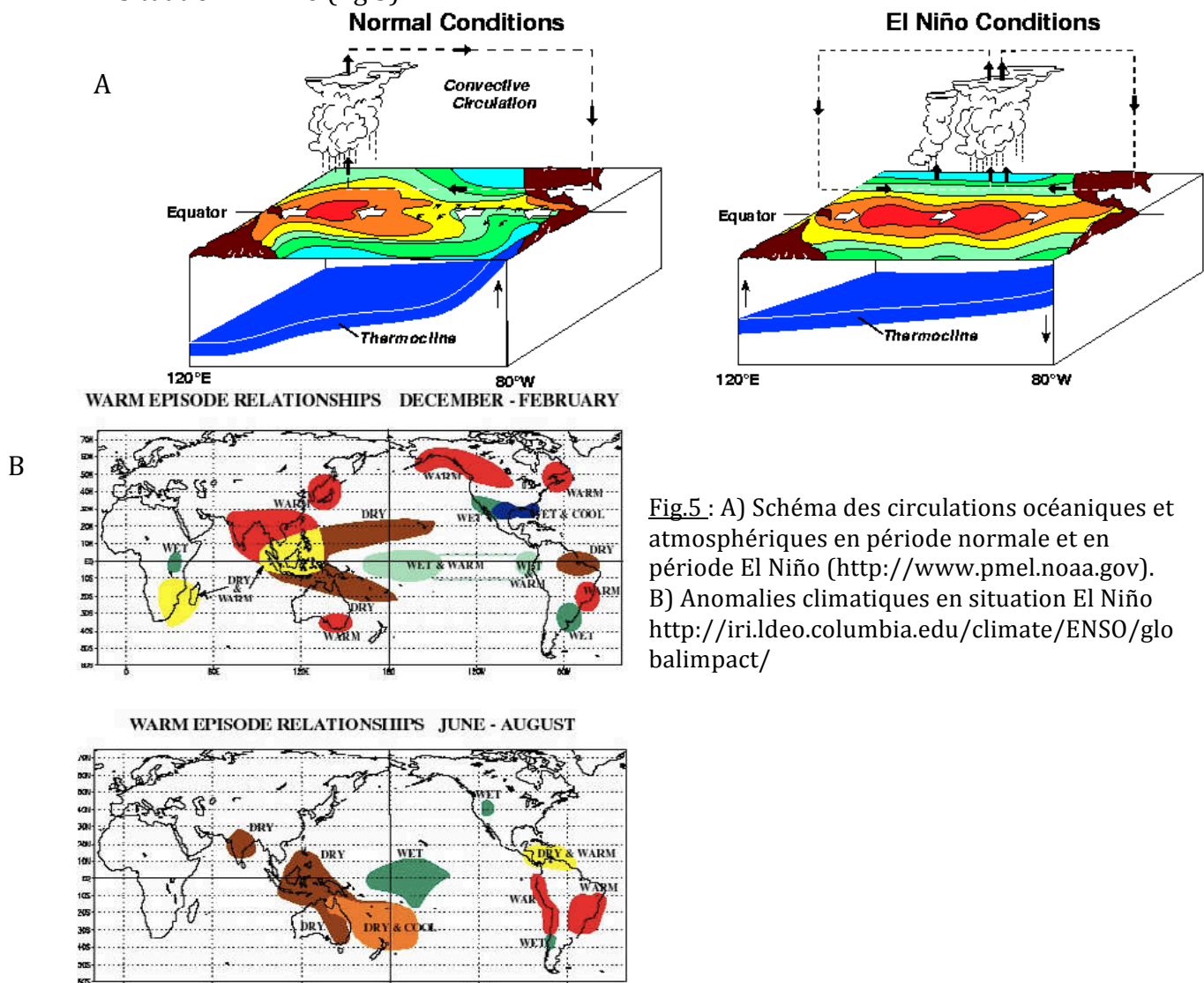


Fig.5 : A) Schéma des circulations océaniques et atmosphériques en période normale et en période El Niño (<http://www.pmel.noaa.gov>). B) Anomalies climatiques en situation El Niño <http://iri.ldeo.columbia.edu/climate/ENSO/globalimpact/>

### 1.3 – La flore

Bien que la Nouvelle-Calédonie soit l'archipel le plus proche du Vanuatu, la flore de ce dernier est bien plus semblable à celle d'Asie du Sud-Est. En effet, les deux archipels n'ont pas la même origine géologique. Alors que le Vanuatu est issu d'activité volcanique récente (Mallick, 1975), la Nouvelle-Calédonie était un élément de l'Australie au Crétacé (créant ainsi la base de la flore), qui s'est ensuite détachée et dont les végétaux ont évolué séparément, parfois sur des terrains ultrabasiques, favorisant donc un fort taux d'endémisme. La flore est amenée d'Asie du Sud-Est au Vanuatu (Schmid, 1987) par le biais de courant marins, aériens et des animaux. La flore de Nouvelle-Calédonie est donc ancienne et présentant un fort taux d'endémisme, alors que celle du Vanuatu est plus récente et relativement plus pauvre.

La flore actuelle du marais d'Emaotfer est composée principalement par des Cyperaceae, des Poaceae, des Nymphaceae, et des fougères (Wirrmann *et al*, 2011). Autour du marais se trouve une zone forestière, dominée par des *Pandanus tectorius* (Pandanaeae), des *Barringtonia edulis* (Lecythidaceae) et des *Hibiscus tiliaceus* (Malvaceae). La végétation au Nord, à l'Est et sur un plateau plus au Sud est constituée, entre autres, par des Urticaceae, des Moraceae, *Homalium* sp (Flacourtiaceae) et *Garuga* sp (Burseraceae).

### 1.4 – L'archéologie

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, le site de Téouma est important par son ancienneté, la présence de poteries complètes et surtout par le grand nombre d'ossements humains retrouvés pour un seul groupe Lapita. Une cinquantaine d'inhumations ont en effet été mises au jour lors des différentes campagnes de fouilles (Bedford *et al*, 2006). De par sa datation, ce site est associé aux premières colonisations du Vanuatu.

L'étude de ce gisement est donc importante afin de mieux connaître les premiers habitants d'Efaté, leur stratégie de colonisation, leur santé, leur régime alimentaire et leur comportement rituel. En effet, bien que la culture Lapita soit originaire de Nouvelle-Guinée, celle-ci semble bien plus complexe que la culture papoue (Numn, 2003).

Ainsi, vers 3000 ans B.P., le renforcement du phénomène El Niño a permis une baisse de la vitesse des alizés, pouvant faciliter la navigation à voiles vers les îles à l'Est de la Nouvelle-Guinée (Anderson *et al*, 2006). La sécheresse accompagnant El Niño a du aussi être un facteur de migration (Anderson *et al*, 2007 ; Kirch, 2000).

D'après les analyses isotopiques des ossements d'adultes inhumés (Bentley *et al*, 2007, Valentin *et al*, 2010), les « Lapita » avaient recours à une exploitation soutenue des ressources marines comme terrestres. Tous n'ont pas le même régime alimentaire, et ne sont pas inhumés de la même façon. Plusieurs hypothèses existent actuellement pour expliquer ces différences : l'appartenance à la première génération de colons, migrants venant d'autres communautés, différence sociale et/ou stress physiologique.

La culture Lapita est surtout remarquable par ses poteries très décorées (à décors géométriques et anthropomorphes), mais aussi très fragiles. Aujourd'hui, l'explication sur l'origine des différences de décors retrouvés sur ces poteries est débattue : sont-elles dues à des différences chronologiques, géographiques, sociales (Bedford *et al*, 2007) ? Grâce aux poteries retrouvées sur le site, clairement associées à un contexte funéraire, il sera possible de comparer les décorations d'une région à l'autre et de mieux comprendre l'usage et la fonction de ces poteries.

## II – L'échantillonnage

### 2.1 – Méthode d'échantillonnage

#### 2.1.1 – Sur le terrain

Les prélèvements de sédiments sont réalisés à l'aide d'un carottier à vibration (Martin et Flexor, 1989, *in* de Mahiques *et al*, 1989). Ce dispositif permet d'enfoncer un tube en aluminium en le faisant vibrer grâce à un moteur. Ce dernier est relié au tube, posé sur un tripode, par une tige flexible. Le moteur fait vibrer la tige, elle même faisant vibrer le tube, lui permettant de s'enfoncer. Deux personnes au moins doivent tenir le tube afin de l'orienter correctement. Celui-ci est sorti du sédiment par un treuil relié au tripode (fig.6).

Afin de faciliter le transport, chacun des tubes mesure 2 mètres de long et ceux-ci sont assemblés sur le terrain par des rivets. De même, une fois le tube sorti, il est découpé en tronçons, et sur chaque tronçon sont notés le nom de la carotte, la date, l'orientation (haut et bas), la profondeur et des flèches de gravités (dirigées vers le bas). Pour que les sédiments ne sèchent pas, chaque segment de tube est fermé.



Fig.6 : prélèvement de sédiment à Emaotfer (Sémah et Wirrmann, 2006)

#### 2.1.2 – Au laboratoire

La carotte sédimentaire est stockée dans une chambre froide jusqu'à son ouverture. Ouvrir une carotte est assez délicat : il s'agit, avec une scie circulaire, de couper le tube en aluminium sur toute sa longueur et sur deux cotés opposés, sans abimer le sédiment. Puis, à l'aide d'un fil en nylon, on ouvre la carotte en deux en reliant les coupures faites par la scie.

Dès que la carotte est ouverte, des photos sont prises afin de connaître 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. Ainsi, tous les centimètres, du sédiment est prélevé, pesé, placé dans une coupelle numérotée et mis à l'étuve pendant une semaine. Le sédiment est ensuite pesé à nouveau, ce qui permet de connaître le poids du sédiment sec et humide.

Chaque échantillon est ensuite partagé entre les différentes analyses à faire :  $^{14}\text{C}$ , sédimentologie, palynologie, etc.

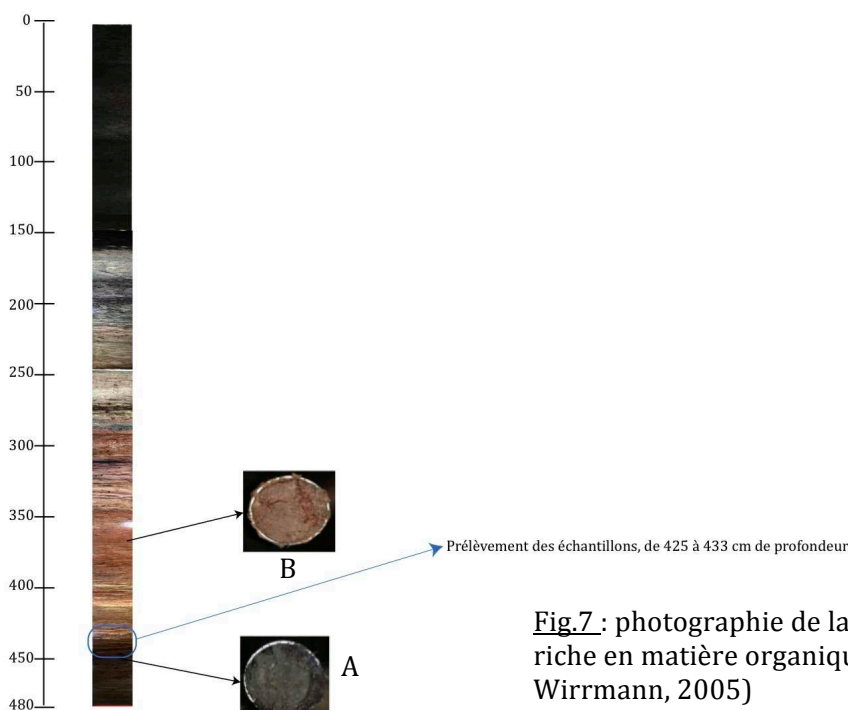
## 2.2 – Description de la carotte Tfer06

La carotte sédimentaire Tfer06 sera utilisée pour cette étude. Elle a été prélevée à  $17^{\circ}47'14.4''$  de latitude Sud et  $168^{\circ}24'01.6''$  de longitude Est (Sémah et Wirrmann, 2006) dans le marais Emaotfer. Elle mesure 5 mètres d'épaisseur et est datée de 6500 ans B.P. à aujourd'hui. La transition étudiée se situe environ à 3500 ans B.P. A ce niveau, des argiles noires sont remplacées par un gel argileux rosâtre (Wirrmann *et al*, 2011 – fig.7).

Les argiles noires, présentes à la base de la carotte, correspondent à l'unité I. Il s'agit d'un sédiment plutôt homogène, riche en matière organique et possédant une densité sèche de  $0.15$  à  $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (densité d'un sédiment déterminé après séchage). Le taux de sédimentation est très faible,  $0.14\text{mm}/\text{an}$  et le rapport C/N est légèrement au dessus de 15, ce qui signifie que la matière organique se décomposait rapidement dans ce sol.

Le gel argileux correspond à l'unité II. Il est composé d'une matrice argileuse très fine et compacte, dans lequel se trouvent des nodules blancs. Ces nodules sont composés d'un assemblage de coquilles d'ostracodes présentant une forte densité sèche ( $0.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). Ces sédiments sont donc plus secs que ceux de l'unité I. Des restes de végétaux (surtout des fragments de feuilles) ont aussi été retrouvés dans cette unité. Contrairement à l'unité I, le taux de sédimentation est dix fois plus important et le rapport C/N est supérieur à 20, témoignant d'une dégradation lente de la matière organique dans ce sol.

Ces deux unités sont principalement composées de calcite, associée à de la pyrite, du quartz, des minéraux argileux et de la silice amorphe. Elles possèdent de relativement faibles proportions de carbone (10 à 20%) par rapport à l'unité supérieure.



**Fig.7 :** photographie de la carotte sédimentaire. A) Argile riche en matière organique. B) Gel bactérien (Sémah et Wirrmann, 2005)

### 2.3 – Choix des échantillons

La période de 3500-3000 ans B.P. est marquée par de grands changements : baisse du niveau marin, assèchement du climat, changement des courants océaniques et aériens, premières migrations mélanésiennes, comme nous avons pu le voir dans l'introduction et dans la première sous-partie. Ces changements ont été enregistrés dans les sédiments d'Emaotfer, comme le montre les données lithologiques, géochimiques et les analyses préliminaires de microfossiles (grain de pollen, ostracodes, diatomées) (Wirrmann *et al*, 2011). Il est donc important d'acquérir de nouvelles informations sur les variations environnementales et climatiques de cette période afin de connaître plus précisément les événements qui se sont produits et de réfléchir à la possibilité d'un lien entre les bouleversements naturels et les données archéologiques, les migrations humaines dépendant en partie des facteurs climatiques.

Par la proximité d'un site archéologique notable, l'étude palynologique de ces échantillons prélevés à Emaotfer permettra de mieux connaître l'environnement que côtoyaient les premiers habitants de l'île d'Efaté, et ainsi de mieux cerner cette civilisation.

Cette série d'échantillons à haute résolution se révèle donc être un matériel privilégié pour la recherche de marqueurs de variations climatiques et eustatiques à l'origine de modification des paysages et des courants marins, et se produisant au même moment que les premières colonisations des îles mélanésiennes.

### I - Extraction de grains de pollen fossiles

#### 1.1 – Echantillons

Au total, huit échantillons ont été choisis pour cette étude. Ils ont été extraits tous les centimètres, de 433 à 425cm de profondeur, au niveau de la transition entre l'unité I et II (voir le point « description de la carotte » dans la première partie). Les échantillons se trouvent à l'Institut de Recherche pour le Développement de Bondy. Les sédiments ont été extraits en 2005 lors d'une mission sur l'île d'Éfaté au cours de laquelle de nombreux carottages sur différents sites ont été réalisés (Sémah et Wirrmann, 2006).

Les sédiments ont été prélevés centimètre par centimètre et placés dans des sachets individuels. Pour chacun des huit échantillons, seule une partie du sédiment est utilisée pour l'analyse pollinique, le restant est réservé pour d'autres études. Des datations  $^{14}\text{C}$  ont été demandées pour ces huit échantillons, afin d'obtenir une chronologie plus précise. De plus, certaines dates que nous possédons actuellement se chevauchent, les rendant discutables en l'état (Wirrmann et *al*, 2011).

#### 1.2 – Traitement chimique

Les échantillons vont subir des attaques chimiques afin de retirer le maximum de matière organique et minérale non désirable. Ainsi, afin de détruire les différents composants présents dans les sédiments, plusieurs étapes sont nécessaires, se basant sur le protocole de Sittler (1995). Pour chaque échantillon, le même poids de sédiment est utilisé (1g). Les sédiments sont réduits en poudre dans un mortier, afin de faciliter l'effet des solutions chimiques sur les sédiments. Les produits utilisés pouvant être dangereux, tout le traitement est réalisé sous une hotte aspirante.

Tout d'abord, l'acide chlorhydrique (HCl) à froid va détruire les carbonates. Les sédiments que nous possédons étant riches en matière organique, cet acide, peu réactif dans notre cas, a plutôt servi de test afin de prouver qu'il n'y avait pas de carbonates.

L'acide fluorhydrique (HF) va par la suite éliminer les silicates présents dans les sédiments. Cet acide est très dangereux et demande beaucoup de précautions. Ainsi, des gants et des lunettes de protection, en plus de la blouse, sont obligatoires pour manipuler. Les sédiments broyés sont placés dans des béciers en PVC (ceux en verre ne résistent pas à l'acide fluorhydrique) et une petite quantité d'acide est versée pour chaque échantillon. A cette étape, afin de ne pas respirer les vapeurs d'acide, les béciers doivent être orientés à l'opposé du préparateur. Les sédiments sont laissés dans l'acide pendant au moins 24 heures.

L'acide chlorhydrique à chaud va dégrader les fluosilicates, formés par l'attaque à l'acide fluorhydrique. La solution va alors être centrifugée et décantée plusieurs fois de suite, jusqu'à ce que le liquide surnageant devienne clair, signifiant qu'il n'y a plus de réaction avec l'acide. Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée, puis à nouveau centrifugés et décantés plusieurs fois.

Les échantillons sont enfin placés dans de la potasse (KOH), qui va détruire les matières organiques, sauf les spores et les grains de pollen, qui possèdent une membrane très résistante en sporopollénine. Les sédiments vont être ensuite placés au



bain-marie, puis centrifugés et décantés. Si les sédiments sont très organiques, la potasse va produire une agglomération des particules. Il faut alors filtrer l'échantillon à 200 µm (diamètre maximum d'un grain de pollen).

Après plusieurs rinçages à l'eau distillée, centrifugations et décantations, les échantillons sont mélangés à une quantité connue de glycérol (une goutte correspond environ à 60µl). Chaque solution est alors transférée dans des petits tubes séparés. Ceux-ci correspondent au culot de chaque échantillon. De ce mélange, 50µl sont prélevés et sont placés entre lames et lamelles. En connaissant donc le volume total du culot et le volume de glycérol, le volume de l'échantillon seul est déduit. Huit lames ont ainsi été montées dans le cadre de ce mémoire. Le traitement dure plusieurs jours car des produits chimiques demandent à être en contact avec les sédiments pendant plusieurs heures afin d'être efficaces et la centrifugation nécessite du temps.

## II – Extraction de grains de pollen frais

### 2.1 – Objectif du traitement

Des échantillons de fleurs ont été prélevés dans l'herbier de Nouméa (Nouvelle-Calédonie), afin d'enrichir la collection de référence de l'IRD de Bondy (sous la responsabilité d'Anne-Marie Sémah). La flore d'Asie du Sud-Est est en effet mal connue et d'une telle diversité qu'il est impossible aujourd'hui d'identifier tous les grains présents sur une lame. Les lames de référence permettent ainsi la détermination des grains de pollen fossiles, en comparant les différents caractères morphologiques des grains frais et fossiles. Dix taxons polliniques, choisis à dessein dans l'herbier du Vanuatu de Nouméa, ont été préparés pour augmenter la collection de référence.

### 2.2 – Traitement chimique

Le traitement chimique n'est pas le même pour obtenir des lames de collection de référence. Les lames de référence ont été préparées par acétolyse, c'est à dire, destruction du cytoplasme par déshydratation (version de ce protocole : A.M. Sémah), ce dernier nous gênerait dans l'observation des grains s'il restait.

Les étamines, après dissection de la fleur sous la loupe binoculaire, ou les fleurs entières (si elles sont trop petites pour permettre une dissection) sont tout d'abord mélangées dans des tubes à essai en pyrex à une solution d'anhydride acétique (9/10) et d'acide sulfurique (1/10) afin de déshydrater les grains de pollen. Les échantillons sont ensuite placés dans un bain-marie à froid, et dont on augmente la température progressivement. Les tubes sont retirés du bain-marie quand l'eau bout. Les solutions ont alors changé de couleur. Les échantillons sont ensuite centrifugés et décantés.

Les solutions sont rincées par de l'acide acétique, puis à nouveau centrifugés et décantés. Cette opération est répétée plusieurs fois (deux fois en moyenne). Les échantillons sont placés ensuite dans de l'eau glycinée pendant 30 minutes environ, centrifugés et décantés encore une fois.

Après la dernière décantation, les tubes sont retournés afin de faire sécher le culot. Celui-ci est récupéré sur un cube de gélatine glycinée, puis posé sur des lames sur une plaque chauffante. Le mélange gélatine – culot est luté entre lame et lamelle par de la paraffine. Une fois les lames obtenues, elles sont numérotées, classées dans la collection de référence et le pollen photographié.

### I – Nomenclature et identification d'un pollen

#### 1.1 – Définition d'un grain de pollen

Les grains de pollen correspondent aux gamétophytes mâles des Angiospermes. Ils sont produits par des étamines et déposés sur des stigmates, après un trajet plus ou moins long dans l'air et/ou dans l'eau. Si les étamines d'où proviennent les grains et les stigmates où ils sont déposés sont compatibles, les grains de pollen germent et forment un tube pollinique qui s'enfonce dans le pistil. La fécondation a lieu dans les ovules (Misset et Gourret, 1989).

La membrane du grain de pollen, ou sporoderme, est composée d'une paroi interne, l'intine (qui n'est pas conservée dans les sédiments) et d'une paroi externe, l'exine. Celle-ci est constituée d'un matériau très résistant, la sporopollénine, permettant au grain de se conserver dans les sédiments et de supporter les attaques chimiques. L'exine est ornementée et possède des zones plus minces, les apertures, qui correspondent à des ouvertures facilitant le passage du tube pollinique. Ces ensembles de caractères diffèrent sur les grains de pollen d'une espèce végétale à une autre (Misset et Gourret, 1989).

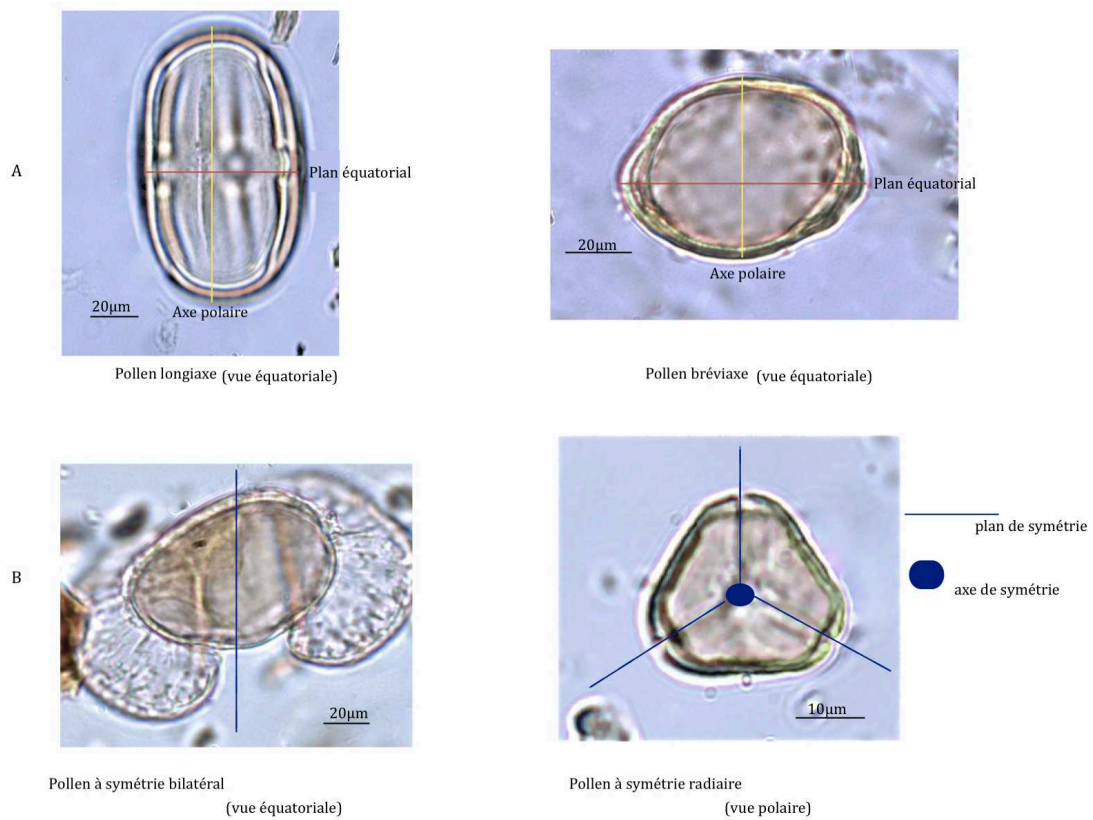
#### 1.2 – Détermination d'un grain de pollen fossile

A chaque espèce végétale donc, correspond un type de grain, qui est déterminé par comparaison avec les grains de pollen actuels (voir Annexe 1 : fiches descriptives de quelques grains de pollen, réalisées lors de ce stage). En effet, les spores de fougères et les grains de pollen ont été peu modifiés depuis l'établissement de la flore actuelle (*in* Sémah *et al*, 2004). Chaque type de grain va être déterminé grâce à sa forme générale, sa taille, les sculptures présentes sur son exine, ainsi que le type (pore ou sillon) et le nombre d'apertures (Punt *et al*, 2007). Ainsi, un type de grain de pollen particulier correspond à un taxon pollinique (espèce ou genre). Afin de déterminer le plus de grains possibles, des ouvrages traitant de la végétation en Asie du Sud Est et dans le Pacifique, ainsi que des ouvrages portant sur la morphologie des grains de pollen de cette région ont été consultés (Backer *et al*, 1965 ; Bulalacao, 1997 ; Chacornac-Rault 2005 ; Erdtman 1966 ; Haberle *et al*. 2007 ; Heywood, *et al*, 1996 ; Laborde, 2010 ; Ledru et Sémah, 1992 ; Munzinger *et al*, 2011 ; Sémah, 2003 ; Siméoni, 2009 ; Wheatley, 1992).

##### 1.2.1 – Forme générale d'un grain de pollen

Un grain possède un axe polaire et un plan équatorial qui lui est perpendiculaire (fig.8.A). En fonction de la taille cet axe et de ce plan, le grain peut être longiaxe (l'axe polaire est plus grand que le diamètre équatorial), inversement, bréviaxe ou sphérique (le diamètre équatorial et l'axe polaire sont de même longueur).

Un grain de pollen est aussi défini en fonction de sa symétrie (fig.8.B) : un grain est bilatéral s'il possède un seul plan de symétrie ; il présente une symétrie radiaire s'il possède plusieurs plans de symétrie, organisés autour d'un axe (comme la plupart des grains) ; enfin, s'il ne possède aucun plan ni axe de symétrie, il est asymétrique.



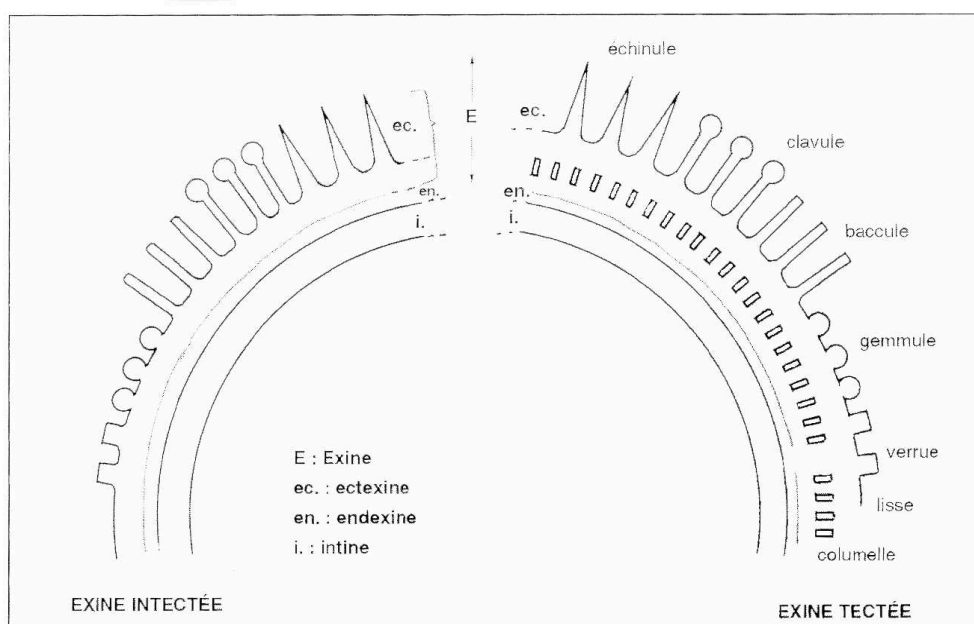
**Fig.8 :** A) Forme du pollen en fonction de la longueur des axes polaire et équatorial. B) Deux symétries possibles pour un pollen.

### 1.2.2 – L'exine

L'exine est subdivisée en deux couches, l'endexine et l'ectexine. La structure de cette dernière est composée au maximum de trois strates (de l'intérieur vers l'extérieur du grain): une sole, des columelles et un tectum.

Dans le cas d'une exine intectée (cas le plus simple), l'ectexine ne possède pas de tectum et les sculptures sont posées directement sur la sole. Dans le cas d'une exine tectée, l'ectexine possède des columelles et un tectum continu, qui correspondent à des clavules (un type de sculpture) dont les parties hautes se sont liées, donnant le tectum. Si le tectum n'est pas continu, l'exine est considérée comme semi - tectée (Renault-Miskovsky et Petzold, 1992 – fig.9).

L'épaisseur de l'exine peut aussi être un critère de détermination, comme, par exemple, si celle-ci est très épaisse par rapport à la taille du grain de pollen.



**Fig.9 :** stratification du sporoderme et les différents types d'ornementation de l'exine (Renault-Miskovsky et Petzold, 1992)

### 1.2.3 – Les apertures

Il existe deux grands types d'ouvertures : celles de forme allongée (colpus ou sillon) parallèles à l'axe polaire, et celle de forme arrondie (pore). Ces ouvertures peuvent se situer dans l'endexine, ce sont des endoouvertures (pores), ou dans l'ectexine et on parle d'ectoouvertures (sillons). Les ouvertures diffèrent selon leur taille, leur largeur et leur bords (épais ou non, déchiquetés ou lisses, changement de l'ornementation près du bord, etc.)

Si le grain possède un ou plusieurs sillons, il est dit colpé, s'il possède un ou plusieurs pores, il est dit poré. Un grain possédant ces deux types d'ouvertures est colpore. En fonction du nombre, le préfixe mono, bi, tri, hexa, stephano ou péri est ajouté au caractère du grain (fig.10).

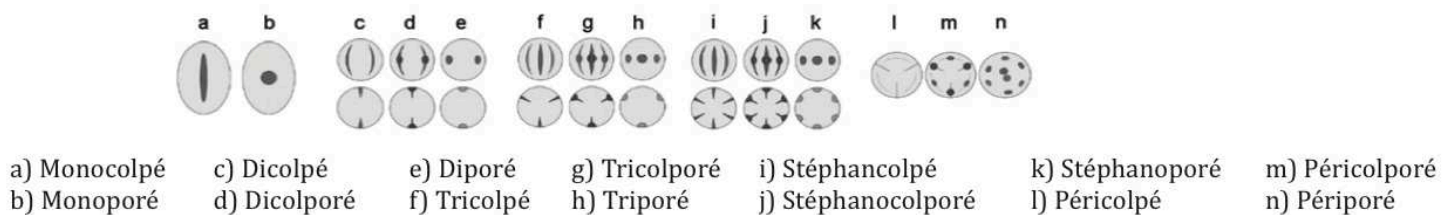


Fig.10 : les types d'ouvertures possibles (Punt et al, 2007)

## 1.3 – Problèmes rencontrés lors des déterminations

### 1.3.1 – Flore mal connue

La flore présente en Asie du Sud-Est est très riche, mais malheureusement toutes les espèces de végétaux ne sont pas encore répertoriées, surtout sur les îles du Pacifique comme le Vanuatu où le recensement de la biodiversité végétale n'a fait l'objet que de quelques études (Cabalion et Lebot, 1986 ; Munzinger et al, 2011 ; Sam et al, 1999 ; Schmid, 1987 ; Siméoni, 2009 par exemple). Des grains de pollen dans les lames de sédiments ne pourront donc pas être déterminés.

### 1.3.2 – Grains de pollen semblables

Les caractères, critères de détermination, relevés sur les grains de pollen de la collection de référence permettent de déterminer un grain le plus souvent jusqu'au genre, voire jusqu'à la famille seulement, parfois jusqu'à l'espèce. Mais une même morphologie pollinique au sein d'une famille, ou présente d'une famille à l'autre, peut correspondre à des exigences écologiques très différentes. Ainsi, si certains grains sont très reconnaissables, comme *Pandanus* ou *Sonneratia*, les grains tricolporés sont plus difficilement identifiables. En effet, beaucoup de familles produisent des grains de pollen tricolporés (les Rubiaceae, les Myrsinaceae, les Euphorbiaceae, les Sapindaceae par exemple) et certains types morphologiques, comme les tricolporés réticulés ou les tricolporés de petite taille, correspondent à énormément de genres et de familles différents.

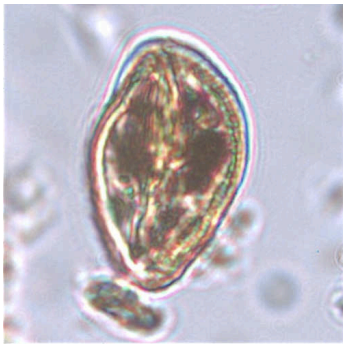
Il faut donc relever le plus grand nombre de caractères visibles sur les grains de la collection de référence et travailler avec les associations végétales afin de reconstituer les paléoenvironnements de la façon la plus fiable possible.

### 1.3.3 – Rapport pluie pollinique et végétation

La pluie pollinique n'est pas tout à fait représentative de la végétation qui l'a produite (Burga et Perret, 1998, *in* Kaltenrieder et Ballmoos, 2003). En effet, en fonction du type de pollinisation, les grains vont être émis en quantité différente et ils vont être dispersés plus ou moins loin. Dans les lames, les grains de pollen peuvent donc être sur ou sous représentés. Par exemple, les plantes propageant les grains par anémogamie (par le vent), vont produire du matériel pollinique en grande quantité et les grains seront dispersés à grande distance, ils seront donc surestimés par rapport aux grains dispersés par entomogamie (par les insectes). Les cas présentés ici sont des cas extrêmes, et afin d'envisager toutes les possibilités de sur et sous représentation de chaque taxon pollinique, tous les cas de figures doivent être connus.

### 1.3.4 – Fragilité de certains grains de pollen

Grâce à sa membrane en sporopollénine, un grain de pollen résiste à la fossilisation et aux attaques chimiques. Cependant, certains grains sont plus fragiles que d'autres : cela dépend de la structure, la sculpture et l'épaisseur de l'exine de chaque grain. Ainsi, les plus fragiles seront plus facilement détruits ou fortement abimés et indéterminables, donc sous-estimés par rapport à des grains plus résistants (fig.11).



**Fig.11** : Même si ce grain fossile n'est pas vraiment abimé, l'exine et les apertures sont difficilement identifiables. Il s'agit sans doute du genre *Excoecaria*, mais pour éviter toute erreur, il a été considéré comme indéterminable.

Les proportions des différents grains de pollen présent dans une lame peuvent être faussées. C'est pour cette raison qu'il faut compter au moins entre 100 et 300 grains par lame de sédiment, sans les grains surabondants, et reconnaître au moins 20 taxons polliniques pour obtenir des résultats statistiquement fiables. Le comptage est donc une étape très longue de l'analyse pollinique, dépendant de la richesse des échantillons en pollen et de l'expérience du palynologue.

## 1.4 – Les associations végétales au Vanuatu

Sur tout l'archipel du Vanuatu, six grands types de végétation sont connus : la rainforest, la forêt broussailleuse et la savane, la forêt des nuages (forêt de montagne), la végétation de formation volcanique récente, la mangrove et la forêt littorale, ainsi que les zones cultivées (Siméoni, P, 2009 ; Sémah et Wirrmann, 2006 ; Munzinger et *al*, 2011 – fig.12).

Mais le Vanuatu est un archipel hétérogène, et tous ces types de végétation ne se retrouvent pas sur l'île d'Efaté. Ainsi, contrairement à Santo par exemple, Efaté ne possède pas de relief supérieur à 700m d'altitude : la forêt des nuages n'y est donc pas présente. De plus, il n'y a pas de formations volcaniques récentes, faute de volcans

encore actifs (Ash *et al*, 1967). Enfin, comme nous allons nous intéresser à une période où l'homme n'a pas (ou peu) influencé le milieu où il vivait, la végétation des zones cultivées n'est pas représentée dans les échantillons étudiés.

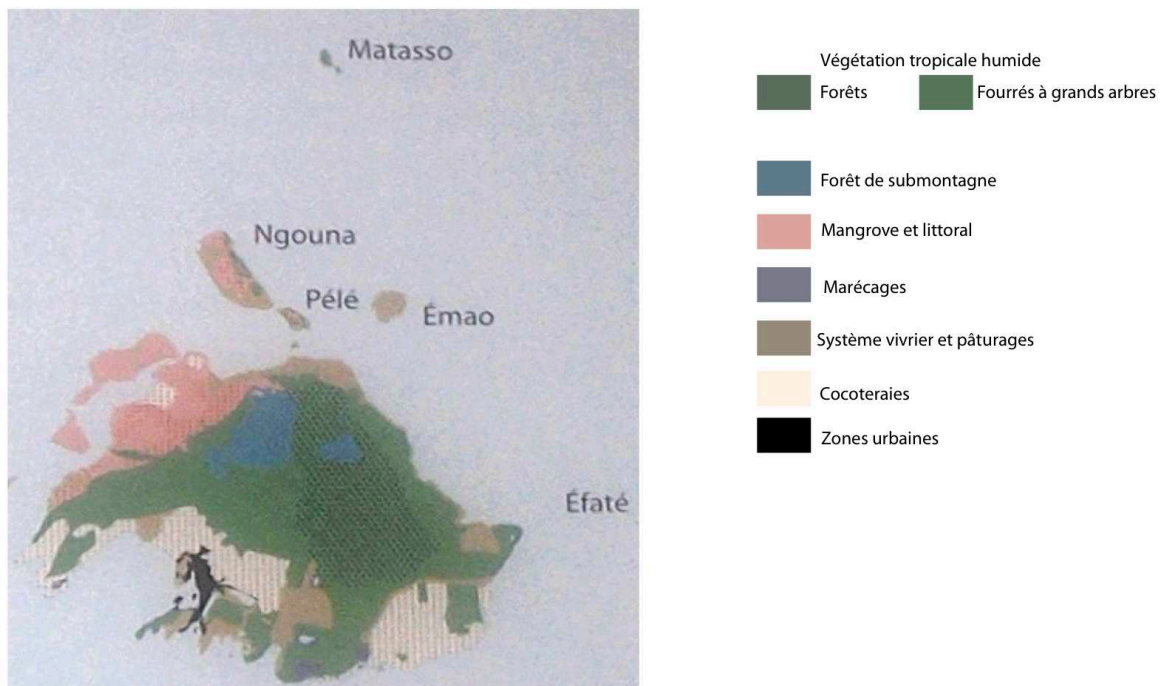


Fig.12 : Répartition actuelle de la végétation sur l'île d'Efate (Siméoni, 2009, modifié)

Cinq associations végétales ont été définies pour notre étude : la rainforest, la mangrove et la forêt littorale, la forêt ouverte, les herbacées marécageuses et les autres herbacées (voir planches photos Annexe 2). Ces associations ont été définies à l'aide des articles de Wirrmann *et al* (2011) ainsi que Munzinger *et al* (2011) et Backer *et al*, (1965).

La rainforest est présente sous un climat chaud et humide, et est composée de grands arbres, comme *Podocarpus*, les Rubiaceae, les Cunoniaceae, les Araliaceae, certains genres de Myrtaceae comme *Syzygium*, ainsi que des fougères arborescentes. La famille des Myrtaceae, très large et très diversifiée, a posé problème quant à son intégration dans cette association végétale. En effet, bien que ce taxon soit plutôt adapté à un environnement humide, certains genres sont très résistants, capables de résister au feu ou à la sécheresse. Nous avons finalement inclus cette famille dans cette association, car les genres identifiés dans les lames dépendent plutôt d'un environnement humide.

La mangrove se situe dans la zone de balancement des marées, et seule une dizaine d'espèces est présente dans l'archipel du Vanuatu (Siméoni, P, 2009 ; Munzinger *et al*, 2011). Ainsi, ce type de végétation est caractérisé par des Rhizophoraceae, *Sonneratia*, et *Excoecaria*. Ces plantes sont adaptées à l'eau salée et à la vase grâce à des racines échasses et des pneumatophores (racines verticales) qui leur permettent de respirer. La végétation en bord de mer est composée de petits arbres, comme *Pandanus*, *Premna*, les Arecaceae, et d'arbres de plus grande taille, comme *Casuarina*, *Vitex*, les Sapotaceae.

La forêt secondaire ou ouverte correspond à une recolonisation de la végétation après une modification importante, anthropique ou naturelle, de l'environnement. Cette forêt est présente sous un climat relativement sec et est composée d'espèces pionnières,

comme *Macaranga*, *Homalanthus*, ainsi que des espèces supportant une plus faible humidité de l'air, comme les Rutaceae, les Moraceae, les Urticaceae, les Mimosaceae (Backer et al, 1965).

Les deux dernières associations végétales correspondent à des environnements ouverts. Les zones ouvertes sont composées d'herbacées comme les Poaceae, les Convolvulaceae, les Typhaceae et les Cyperaceae. La présence de Cyperaceae et de Typhaceae peut correspondre à des marécages, la présence de Poaceae témoigne d'un environnement relativement sec.

Ainsi, en connaissant ces associations végétales, il est possible de déterminer des grains de pollen difficilement identifiables ou facilement confondus avec des grains d'écologie différente sur des lames.

## II – Richesse des échantillons

La concentration en spore et en pollen de chaque échantillon est calculée pour chaque lame, une lame correspondant à environ 50µl du culot résiduel mélangé à du glycérol pour le montage de la lame. Ainsi, pour les échantillons où le comptage est réalisé sur la lame entière, le nombre de grains pour 50µl est connu directement. Dans les cas où le comptage n'est pas réalisé sur toute la lame, il faut connaître le nombre de lignes parcourues (les lignes correspondent au quadrillage horizontal présent sur la platine du microscope). Une lame entière équivaut à 12 lignes en moyenne, au grossissement 40. En connaissant le nombre de lignes effectuées pour chaque lame, le nombre de grains par lame est facilement calculable. Une fois obtenu le nombre de grains pour 50µl, il est possible de déduire la quantité de grains présents dans culot initial. Celui-ci est calculé en soustrayant le volume du glycérol au culot total contenu dans le tube à essai. Ce culot correspondant à un gramme, nous pouvons donc connaître le nombre de grains par gramme.

Cette étude étant réalisée à haute résolution (tous les cm), l'évolution du flux pollinique pendant la période de 3500 ans B.P. pourra être reconstituée grâce à la concentration en grains de chaque échantillon.

## III - Datations

Lors de l'étude faite en 2011 par Wirrmann et al, des datations au <sup>14</sup>C ont été réalisées sur toute la profondeur de la carotte. Mais les dates sont inversées au niveau de la profondeur où ont été prélevés les sédiments étudiés. Ainsi, à 441cm de profondeur, les sédiments ont été datés autour de 3001-3316 ans B.P., alors qu'à 432cm de profondeur, les sédiments ont été datés autour de 3644-3867 ans B.P (fig.13). Une demande a été faite en janvier dernier afin d'obtenir des datations à 420cm et à 450cm de profondeur. Malheureusement, aucun résultat ne nous est parvenu jusqu'à présent.

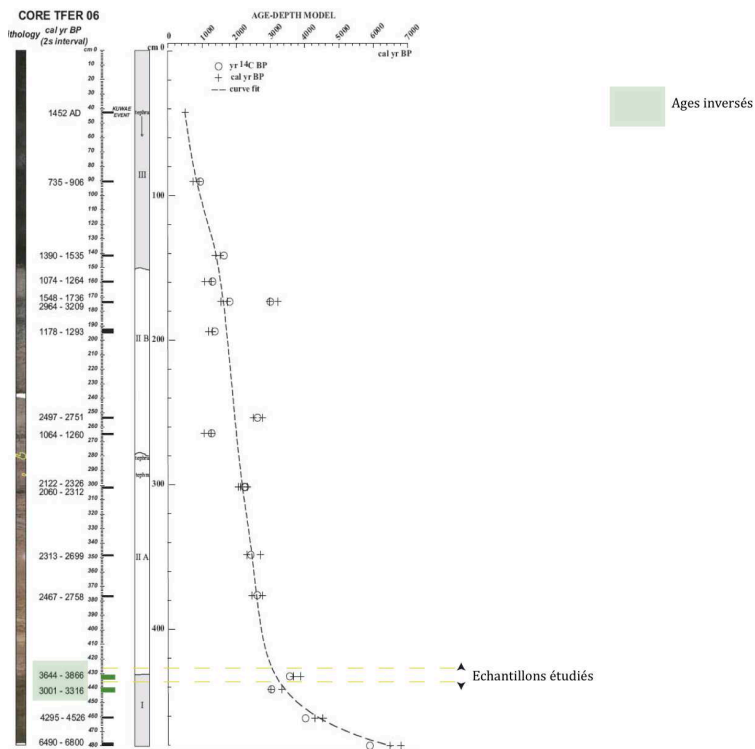


Fig. 13 : Modèle âge – profondeur de la carotte Tfer06 (Wirrmann et al, 2001, modifié)

Cette anomalie peut être due à des éruptions volcaniques, qui, en rejetant un surplus de  $^{12}\text{C}$  dans l'atmosphère, change le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ , perturbant ainsi les résultats (Maloney, 1984). Il est vrai que le Vanuatu, situé dans la ceinture de feu du Pacifique, possède de nombreux volcans. Cependant, des téphras n'ont pu être observés que dans des sédiments bien plus récents : aucune trace de dépôt volcanique n'a été observée entre 440 et 420 cm de profondeur (Wirrmann et al, 2011).

Il est donc plus probable que cette inversion de dates soit due à un remaniement des sédiments, d'origine naturelle et anthropique. En effet, le changement de sédimentation observé (voir point 2.2 de la première partie) autour de 440-430 cm de profondeur témoigne d'une modification de l'environnement. Cette variation a pu être à l'origine de phénomènes comme l'érosion ou le changement brusque du taux de sédimentation voire l'arrêt de la sédimentation. Ces phénomènes occasionnent une limite discontinue entre les deux types de sédiments : ainsi, à une même profondeur, des échantillons prélevés peuvent présenter des âges différents. De plus, l'Homme, ayant migré vers les archipels mélanésiens autour de 3000 ans B.P., a pu changer son environnement. De sorte que, même si l'alimentation des habitants de Téouma était principalement basée sur des ressources marines et terrestres faciles d'accès, ces derniers produisaient un peu de nourriture, grâce à l'élevage et peut être aussi à la culture de tubercules (Valentin et al, 2009 ; Valentin et al, 2010). Ces activités peuvent être à l'origine de production de charbons de bois, riches en  $^{12}\text{C}$ , dans le cas d'une déforestation à l'aide de feux (Maloney, 1984). Des charbons de bois ont effectivement été retrouvés dans les sédiments, mais ils n'ont pas été analysés, faute de temps.

Les datations effectuées dans des échantillons prélevés à 460 cm et 376 cm de profondeur indiquent que les sédiments sont âgés de 4526 ans B.P. à 2492 ans B.P. En prenant un taux de sédimentation moyen de 0.7mm/an (Wirrmann et al, 2011), nous pouvons considérer que les sédiments compris entre 433 et 425 cm de profondeur sont



datés d'environ 3900 ans B.P à 3200 ans B.P. Cependant, ces datations sont très approximatives, car le taux de sédimentation change brusquement vers 430cm de profondeur.

## IV – Description des diagrammes polliniques

### 4.1 – Construction d'un diagramme

La réalisation d'un diagramme pollinique demande du temps : cela nécessite en effet de juxtaposer des colonnes contenant l'évolution de chaque taxon, tout en prenant garde à conserver la même échelle. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Adobe Illustrator, qui permet de configurer un grand nombre de paramètres, comme par exemple : le choix de l'échelle, la taille des histogrammes, la couleur ou la possibilité de dissocier tous les objets appartenant à un seul graphe. Dans le cadre de cette étude, deux diagrammes ont été créés : le premier correspond au diagramme complet comprenant l'évolution de tous les taxons, déterminés ou non, ainsi que la concentration en grain par échantillon ; le deuxième diagramme présente l'évolution des cinq grandes associations végétales définies dans le point 1.4 de ce chapitre.

Les spores, parfois dénombrées en grande quantité, n'ont pas été prises en compte dans le calcul des pourcentages des taxons afin de ne pas diminuer de façon conséquente des familles ou des genres déjà trouvés en faible proportion, mais dont la présence est souvent d'une grande importance en terme d'écologie (comme les Araliaceae ou les Sapindaceae). Afin de pouvoir étudier leur évolution, les spores sont ainsi comptabilisées uniquement dans la colonne AP/NAP/Spores du premier diagramme.

Sur les huit lames étudiées, deux d'entre elles (429-430 et 430-431) sont très pauvres : moins d'une dizaine de grains pour chaque échantillon ont pu être retrouvés. L'analyse pollinique ne nous permettant pas de restituer l'environnement de cette période, d'autres disciplines comme la sédimentologie, l'étude des diatomées et des ostracodes (voir la partie 4) vont être utilisées afin de compléter les données de la palynologie (tableau 1).

### 4.2 – Description du diagramme pollinique complet

Dans ce premier diagramme, la distribution des grains de pollen et des spores est représentée pour les huit échantillons. Les taxons sont organisés en deux groupes : AP (Arboreal Pollen) et NAP (Non Arboreal Pollen), et au sein de chaque groupe, les taxons sont classés par ordre alphabétique de famille (fig.14).

Pour la plupart des échantillons, les AP sont dominants, même si ceux-ci diminuent au profit des spores et des NAP vers le haut du diagramme. Certains taxons sont retrouvés dans tous les échantillons, avec des proportions variables ou non, comme les Myrsinaceae, les Podocarpaceae, les Malpighiaceae, les Elaeocarpaceae, ou les Cunoniaceae. A l'inverse, des taxons sont présents principalement dans la partie basse du diagramme (Myrtaceae ou Araliaceae par exemple) et d'autres uniquement dans la partie haute (*Macaranga* ou *Homalanthus*). Les NAP sont constamment dominés par les Cyperaceae

	425-426	426-427	427-428	428-429	429-430	430-431	431-432	432-433								
Anacardiaceae	1	0,819	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Araliaceae	2	1,639	1	0,87	1	0,9	1	0,962	0	0	0	0	4	3,636	1	1,031
Arecaceae	0	0	0	0	0	0	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Boraginaceae	0	0	1	0,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Casuarinac	0	0	2	1,74	0	0	1	0,962	0	0	0	0	2	1,818	0	0
Ascarina	0	0	1	0,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terminalia	0	0	1	0,87	0	0	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Cunoniaceae	6	4,918	5	4,348	5	4,505	5	4,808	0	0	0	0	5	4,545	6	6,186
Elaeocarpaceae	4	3,279	3	2,609	4	3,063	6	5,769	0	0	0	0	5	4,545	5	5,155
Acalypha	0	0	1	0,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,031
Claoxylon	0	0	0	0	1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cleidion	0	0	0	0	0	0	2	1,923	0	0	0	0	0	0	0	0
Excoecaria	9	7,377	7	6,087	7	6,306	6	5,769	0	0	0	0	8	7,277	4	4,124
Glochidion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Homalothus	2	1,639	3	2,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Macaranga	8	6,557	3	2,61	2	1,802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mallotus	4	3,279	0	0	2	1,923	2	1,923	0	0	0	0	0	0	0	0
Erythrina	2	1,639	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,031
Parkia	0	0	1	0,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres Fabac	1	0,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gnetaceae	0	0	0	0	0	0	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Engelhardia	0	0	0	0	0	0	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Loganiaceae	1	0,82	1	0,87	1	0,901	1	0,962	0	0	0	0	0	0	1	1,031
Lythraceae	0	0	0	0	1	0,901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Malpighiaceae	2	1,639	1	0,87	1	0,901	1	0,962	0	0	0	0	0	0	3	3,093
Menispermaceae	1	0,82	0	0	1	0,901	0	0	0	0	0	0	1	0,901	2	2,062
Moraceae	0	0	3	2,61	3	2,703	2	1,923	0	0	0	0	0	0	2	2,062
Myrsinaceae	30	24,59	26	22,61	25	22,522	21	20,192	0	0	0	0	23	20,901	14	14,433
Myrtaceae	1	0,819	0	0	0	0	1	0,962	0	0	0	0	4	3,636	2	2,062
Pandanus	0	0	1	0,87	0	0	1	0,962	0	0	0	0	1	0,901	0	0
Piperaceae	0	0	3	2,61	5	4,505	1	0,962	0	0	0	0	4	3,636	3	3,093
Podocarpac	6	4,918	3	2,61	5	4,505	4	3,846	0	0	0	0	3	2,728	3	3,093
Rhizophorac	5	4,098	6	5,217	7	6,306	7	6,731	0	0	0	0	12	10,901	17	17,523
Rubiaceae	1	0,82	0	0	2	1,802	2	1,923	0	0	0	0	6	5,455	5	5,155
Rutaceae	1	0,82	4	3,478	1	0,901	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapindaceae	1	0,82	1	0,87	1	0,901	1	0,962	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapotaceae	1	0,82	1	0,87	1	0,901	1	0,962	0	0	0	0	0	0	1	1,031
Sonneratia	2	1,639	3	2,61	3	2,703	2	1,923	0	0	0	0	3	2,728	2	2,062
Ulmaceae	0	0	0	0	1	0,901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Urticaceae	4	3,28	9	7,826	4	3,603	5	4,808	0	0	0	0	8	7,278	5	5,155
Premna	3	2,459	0	0	3	2,703	5	4,808	0	0	0	0	1	0,909	1	1,031
Vitex	3	2,459	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>AP</b>	<b>101</b>	<b>82,787</b>	<b>91</b>	<b>79,13</b>	<b>87</b>	<b>78,378</b>	<b>83</b>	<b>79,807</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>91</b>	<b>82,727</b>	<b>79</b>	
Convolvulac	1	0,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cyperaceae	6	4,918	13	11,304	7	6,306	7	6,731	0	0	0	0	5	4,545	2	2,062
Poaceae	1	0,82	0	0	4	3,603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Typha	1	0,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>NAP</b>	<b>9</b>	<b>7,377</b>	<b>13</b>	<b>11,304</b>	<b>11</b>	<b>9,901</b>	<b>7</b>	<b>6,731</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>4,545</b>	<b>2</b>	
Indet	12	9,836	11	9,565	13	11,711	14	13,462	0	0	0	0	14	12,727	16	16,494
<b>Total sans spores</b>	<b>122</b>	<b>100</b>	<b>115</b>	<b>100</b>	<b>111</b>	<b>100</b>	<b>104</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>110</b>	<b>100</b>		
AP	101	54,301	91	47,895	87	40,092	83	49,112	0	0	0	0	91	50	79	58,955
NAP	9	4,839	13	6,842	11	5,069	7	4,142	0	0	0	0	5	2,747	2	1,493
Spores	64	34,409	75	39,474	106	48,848	65	38,462	0	0	0	0	82	38,46	37	27,611
Indet	12	6,452	11	5,789	13	5,99	14	8,284	0	0	0	0	14	7,692	16	11,94
<b>AP+NAP+Sp</b>	<b>186</b>	<b>100</b>	<b>190</b>	<b>100</b>	<b>217</b>	<b>100</b>	<b>169</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>182</b>	<b>100</b>	<b>134</b>	<b>100</b>
Concentration	413,314		542,86		2170		375,56		0	0	0	0	1365		134	
Nombres de taxons	30		26		27		28		0	0	0	0	20		21	

Tableau 1 : Récapitulatif du comptage, en quantitatif (première colonne) et en pourcentage (deuxième colonne)

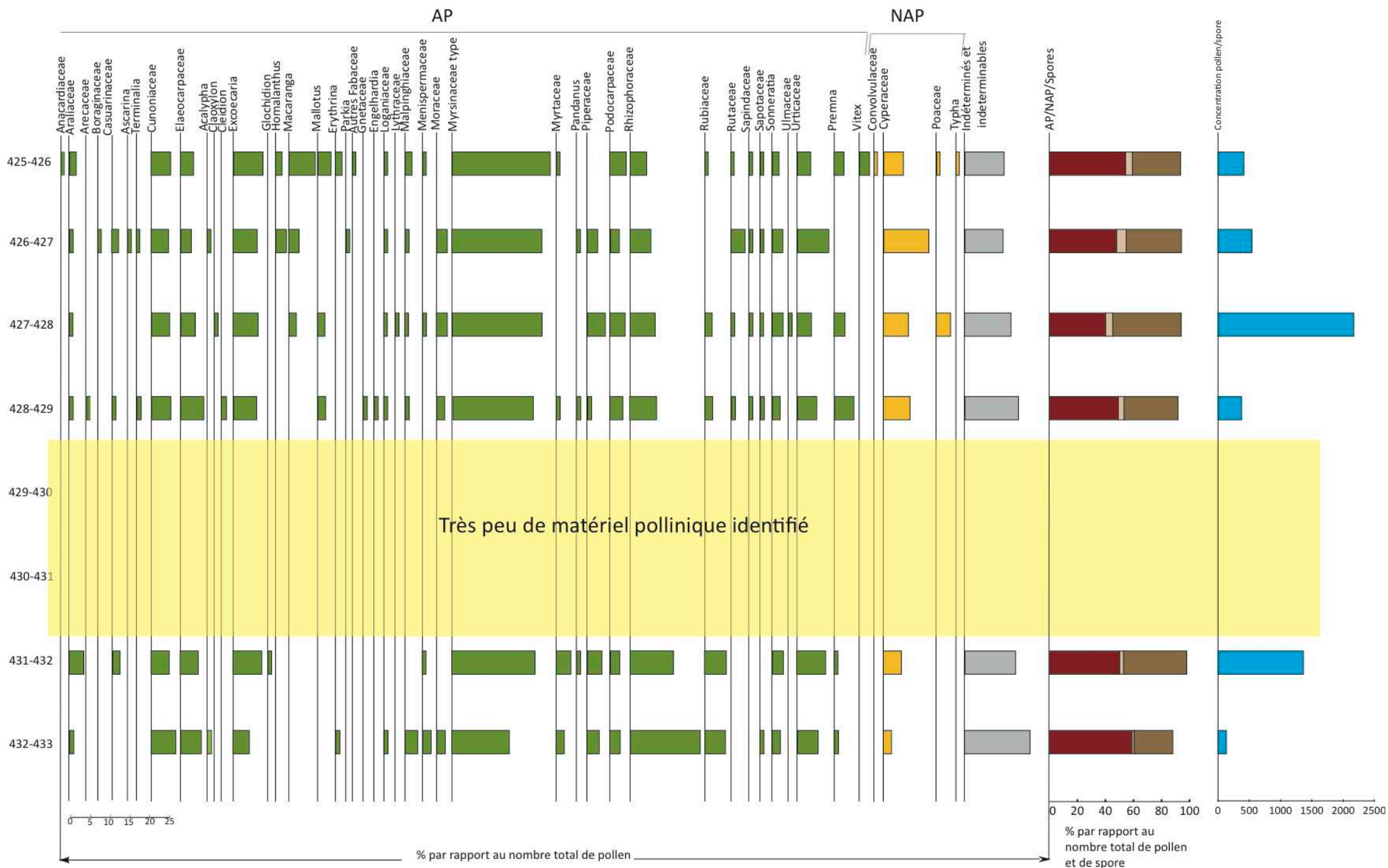


Fig.14 : Diagramme pollinique complet

La famille des Myrsinaceae a été identifiée dans six échantillons, avec un pourcentage assez constant, compris entre 15 et 20%. Cette famille est composée d'arbres, arbustes, lianes ainsi que d'herbacées, et ses genres appartiennent à la rainforest comme à la forêt ouverte. Cette famille cosmopolite possède le même type de pollen (petit grain tricolporé, faiblement ou non ornementé) et tous les genres ne sont pas facilement identifiables. Ainsi, même si certains grains ont pu être déterminés jusqu'au genre, afin d'éviter toute erreur risquant de modifier le résultat final, toutes les Myrsinaceae ont été rassemblées en un groupe n'ayant aucune signification écologique : « Myrsinaceae type » et dont le pourcentage constitue un bruit de fond (voir la planche photo en Annexe 3). Ce groupe devra être étudié plus en détail, afin de déterminer les genres qui le composent.

#### *Echantillon 432-433*

Dans cet échantillon, les AP possèdent le plus grand pourcentage enregistré dans les sédiments étudiés (environ 60%). A l'inverse, les NAP, représentés uniquement par les Cyperaceae, sont présents en très faible quantité, et la concentration en spore et pollen est la plus basse de tous les échantillons. Les AP sont principalement constitués de Rhizophoraceae, de Cunoniaceae, d'Elaeocarpaceae et de Rubiaceae (respectivement 17%, 6% et 5,2% pour les deux derniers taxons). D'autres taxons, comme *Excoecaria*, *Premna*, les Menispermaceae, les Myrtaceae, les Sapotaceae et les Moraceae possèdent aussi des pourcentages relativement importants. Des grains d'*Erythrina* et d'*Acalypha* ont aussi été observés.

#### *Echantillon 431-432*

La proportion de NAP et de spores augmente légèrement, au détriment des AP. La concentration en matériel sporopollinique s'accroît de façon très importante. Les valeurs des Urticaceae (7%), des Myrtaceae (3,6%), des Araliaceae (3,6%), *Excoecaria* (7,3%) et *Sonneratia* (2,7%) augmentent jusqu'à atteindre leur pourcentage maximum. Bien que les Menispermaceae et les Rhizophoraceae décroissent, ils sont toujours présents de façon notable, accompagné de *Pandanus* et des Casuarinaceae (les Rhizophoraceae sont toujours les AP dominants). Des grains de *Glochidion* sont identifiés.

#### *Echantillon 428-429*

La proportion de NAP augmente à nouveau par rapport à l'échantillon 431-432, grâce à l'accumulation de pollen de Cyperaceae dans les sédiments. Cette augmentation se produit au détriment des spores, la proportion de AP étant semblable à celle de l'échantillon 431-432. Certains taxons apparaissent, comme les Rutaceae, les Sapindaceae (dont les proportions vont stagner par la suite) et *Mallotus*, tandis que d'autres sont en forte diminution, comme les Rhizophoraceae et les Rubiaceae (baisse respective de 4% et 3%), voire atteignent leur pourcentage minimum, comme *Excoecaria*, les Myrtaceae, *Sonneratia*, les Sapotaceae et les Urticaceae. D'autres taxons sont aussi présents, comme *Premna* (4%) les Moraceae, *Pandanus*, les Araliaceae et les Casuarinaceae. Les Arecaceae, *Engelhardia* et *Cleidion* sont quelques taxons qui ont été identifiés uniquement dans cette lame.

#### *Echantillon 427-428*

Dans cet échantillon, la concentration en matériel sporopollinique, ainsi que les spores atteignent leur pourcentage maximum (49%). La proportion en NAP, favorisée

par la présence des Poaceae et des Cyperaceae, continue aussi de s'accroître, au profit des AP qui présentent leur taux le plus bas (40%). Le genre *Macaranga* apparaît, les Moraceae et *Excoecaria* augmentent, bien que ce dernier ne progresse que faiblement. Des grains de *Claoxylon*, d'Ulmaceae et de Lythraceae sont aussi observés. Des taxons présents dans les sédiments les plus anciens, comme les Rhizophoraceae, les Araliaceae, et les Sapotaceae gardent des proportions réduites et assez stables dans les échantillons 427-428 et 426-427, alors que les Myrtaceae disparaissent de ces deux lames.

#### *Echantillon 426-427*

Après avoir atteint un maximum, la concentration en spore et pollen diminue fortement. Les NAP parviennent à leur pourcentage maximum (6,8%) au profit des spores, et la proportion en AP augmente légèrement. Le genre *Homalanthus* apparaît, *Macaranga* augmente, et les Cyperaceae, les Rutaceae ainsi que les Urticaceae atteignent leur plus grand pourcentage enregistré dans les échantillons. Les Rubiaceae et les Menispermaceae ne sont pas retrouvés dans cette lame. Les Urticaceae, les Rhizophoraceae et *Excoecaria* sont les taxons qui composent principalement les AP. Des grains de Boraginaceae, *Ascarina*, *Terminalia*, *Acalypha* et *Parkia* sont notés.

#### *Echantillon 425-426*

Dans ce dernier échantillon, la concentration en spore et en pollen reste assez constante, le pourcentage de AP augmente de façon assez notable (6%), tandis que le taux de spores et de NAP diminue. Des taxons présents en faible proportion ou disparus dans les trois échantillons précédents, comme les Araliaceae, *Excoecaria*, les Menispermaceae et les Myrtaceae se développent à nouveau. A l'inverse, des grains présents en quantité assez importante dans les trois échantillons précédents deviennent moins nombreux, comme *Homalanthus*, les Rutaceae, les Urticaceae, voire disparaissent, comme les Moraceae. Cependant, *Mallotus* et *Macaranga* continuent d'augmenter, jusqu'à atteindre leur pourcentage maximum. *Macaranga* et *Excoecaria* correspondent aux taxons dominants des AP. De plus, même si la proportion de NAP diminue, les herbacées possèdent, dans cet échantillon, la plus grande diversité de taxons parmi tous les sédiments étudiés : des Cyperaceae, des Convolvulaceae, des Typhaceae et des Poaceae ont été identifiés. Des grains de *Vitex*, *Erythrina* et d'Anacardiaceae ont été déterminés dans cette lame.

### 4.3 – Description du diagramme d'associations végétales

Dans ce deuxième diagramme, l'évolution des cinq grandes associations végétales, définies dans le point 1.4 de cette partie, est représentée pour les huit échantillons (fig.15). L'interprétation de ce diagramme permettra de connaître les modifications de la végétation et du climat au niveau local (herbacées et mangrove) et plus régional (rainforest et forêt ouverte).

#### *Echantillon 432-433*

Dans cet échantillon, la mangrove correspond à l'association végétale la plus importante, représentant 27% de la végétation totale, ce qui équivaut à son pourcentage le plus élevé enregistré dans les sédiments étudiés. La rainforest présente aussi un pourcentage notable (20%), alors que la forêt ouverte ne constitue que 10% de la végétation totale, et que la proportion d'herbacées de marécages atteint son plus bas niveau dans ces sédiments.

#### *Echantillon 431-432*

La rainforest augmente par rapport à l'échantillon précédent, et atteint son pourcentage maximum, 22%. Elle devient l'association végétale principale. Ce développement est accompagné par une légère progression des herbacées de marécages. A l'inverse, les proportions de mangrove et de forêt ouverte subissent une faible baisse.

#### *Echantillon 428-429*

La rainforest est réduite assez considérablement par rapport à l'échantillon 431-432 (baisse de 6%), tandis que la forêt ouverte progresse, avec une augmentation de 4,5%. La mangrove et les herbacées de marécages subissent des variations moindres : respectivement une diminution de 1,5% et une hausse de 2,2%. Cependant, la mangrove et la rainforest restent les associations végétales dominantes.

#### *Echantillon 427-428*

Les tendances que nous avons observées dans l'échantillon précédent se retrouvent dans celui-ci, sauf pour le cas des herbacées de marécages dont la proportion reste stable. Les variations de pourcentages de la rainforest, de la forêt ouverte et de la mangrove se situent entre 3% et 4%. L'apparition d'autres herbacées que celles existant dans les marécages est aussi observée.

#### *Echantillon 426-427*

Dans ce niveau, la mangrove et la rainforest présentent les plus faibles pourcentages enregistrés dans les échantillons étudiés : respectivement 18,3% et 8,7%. A l'inverse, les pourcentages de forêt ouverte et d'herbacées de marécages augmentent jusqu'à atteindre les valeurs maximum de 22,6% et de 11,3% respectivement. La forêt ouverte devient alors dominante dans le paysage à cette période.

#### *Echantillon 425-426*

Dans ce dernier échantillon, la rainforest et la mangrove se développent légèrement (augmentation de 2% à 4%), tandis que la forêt ouverte et les herbacées de marécages régressent faiblement (diminution de 4% à 5%). Quelques herbacées, autres que celles vivant dans les marécages, sont présentes à ce niveau. Cependant, la forêt ouverte est toujours l'association végétale dominante, accompagnée de la mangrove.

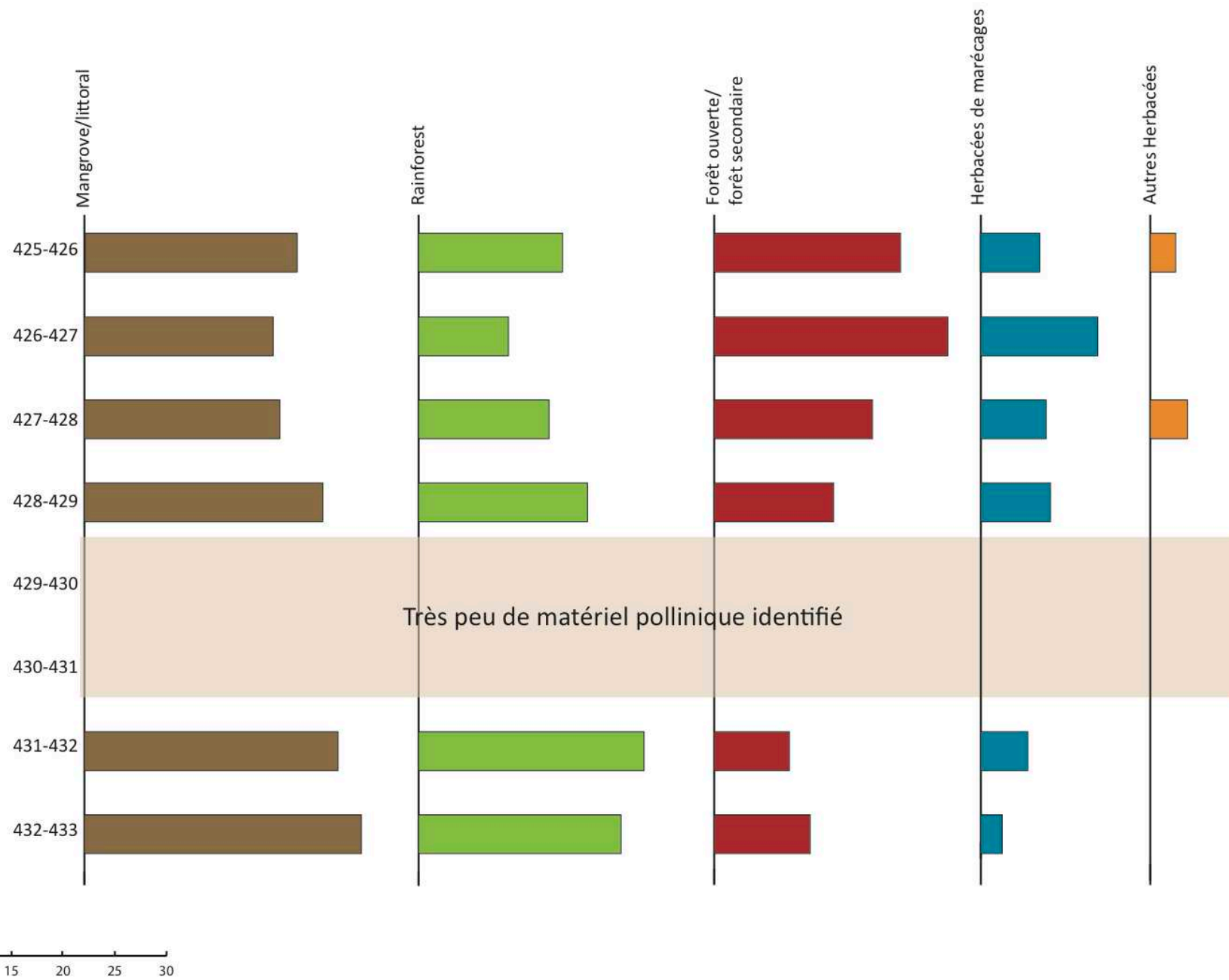


Fig.15 : Diagramme pollinique - Associations végétales

## Interprétation des diagrammes

L'intérêt d'une étude à haute résolution est de pouvoir interpréter de petites variations environnementales ou climatiques, pas nécessairement détectables avec une analyse plus globale. Ainsi, l'évolution de la végétation va être commentée pour chaque échantillon, et non pas par zones polliniques (groupes d'échantillons qui diffèrent des niveaux adjacents par la variation d'au moins deux taxons importants).

La pluie pollinique n'étant pas toujours représentative de la végétation (point 1.3.3 de la partie précédente), des échantillons de surface sont récoltés afin de connaître le rapport végétation/pluie pollinique actuelle. Ce rapport est appliqué à la pluie pollinique de la période étudiée (principe d'actualisme) permettant ainsi d'estimer les biais, dus aux différents modes de pollinisation, dans les résultats de l'analyse palynologique. Dans notre cas, l'étude des échantillons de surface n'étant pas disponible, l'interprétation des diagrammes polliniques demande quelques réserves.

L'interprétation de l'évolution de la végétation en terme d'environnement et de climat est basée sur les ouvrages suivants : Backer et *al*, 1965 ; Chacornac-Rault 2005 ; Munzinger et *al*, 2011 ; Sémah et *al*, 1992 ; Siméoni, 2009 ; Wheatley, 1992.

### I – De 433 à 432 cm de profondeur

A ce niveau, les forêts constituent la majorité du paysage, avec un pourcentage d'arbres autour de 60%. Le milieu dans lequel se sont déposés les sédiments était alors plutôt fermé, avec une très faible présence d'herbacées et quelques fougères.

La végétation de mangrove et de littoral, dominée par les Rhizophoraceae, est très présente dans cet enregistrement pollinique, témoignant d'un bord de mer proche du site étudié. La forte présence de Cyperaceae, famille existant généralement dans des zones humides, est un indice de la proximité immédiate d'un marécage ou d'un lac peu profond. En effet, les grains de pollen de cette famille ne se dispersent que très peu (Bunting, 2003). La faible proportion de ce taxon dans cet échantillon signifie que les sédiments se sont déposés dans un lac assez profond.

La rainforest est aussi un environnement bien répandu à cette période, composé principalement de Cunoniaceae, Rubiaceae et de Podocarpaceae. A l'inverse, seules quelques Moraceae et Urticaceae représentent la forêt ouverte. Le climat de cette époque, majoritairement chaud et humide, favorisait donc la formation de forêts pluviales.

### II – De 432 à 431 cm de profondeur

Par la suite, la forêt régresse légèrement, au profil d'un développement des herbacées, constituées uniquement de Cyperaceae, et des fougères. Mais les taxons d'arbres restent dominants, attestant de l'importance de la forêt dans le paysage.

La végétation de mangrove et de littoral subit une petite baisse. Cette variation est surtout influencée par une diminution des Rhizophoraceae, remplacées en partie par *Excoecaria*. Or, les forêts de mangrove présentent fréquemment des zonations, chacune correspondant à une végétation spécifique, parallèles au trait de côte et au bord des chenaux (fig.16). Ainsi, les Rhizophoraceae sont des palétuviers vivant plus proche du



front de mer que *Excoecaria*, qui est plutôt un arbre peuplant le littoral (Tomlinson, 1986). Cette modification dans l'enregistrement pollinique peut être interprétée comme un léger retrait du niveau de la mer, occasionnant le remplacement de la mangrove par l'arrière mangrove. L'expansion des Cyperaceae démontre que l'environnement local est devenu plus favorable au développement de cette famille, et témoigne donc d'un abaissement du niveau du lac.

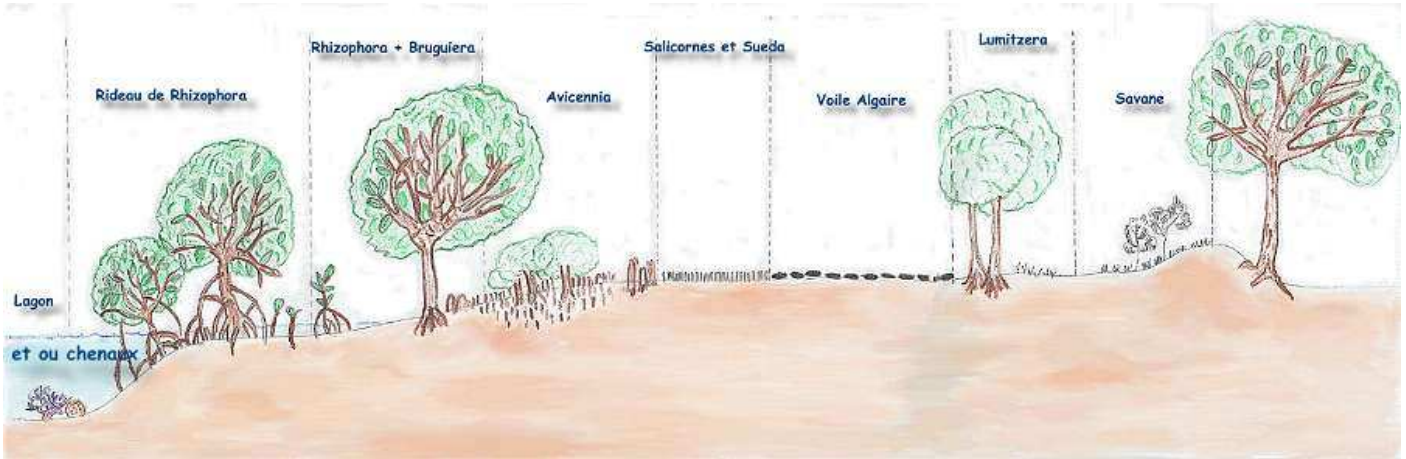


Fig.16 : Zonation de la mangrove : le type de végétation varie de la mangrove jusqu'à l'arrière mangrove (zonation de la mangrove en Nouvelle-Calédonie : [http://duduf2.free.fr/mangrove/zone\\_mang.htm](http://duduf2.free.fr/mangrove/zone_mang.htm)).

La rainforest correspond à l'environnement dominant à cette période. Plus diversifiée que la rainforest présente dans l'échantillon précédent, celle-ci est composée principalement de Rubiaceae, Cunoniaceae, Podocarpaceae, Araliaceae et Menispermaceae. A l'inverse, la forêt ouverte est le milieu le moins représenté dans ce spectre. Les taxons identifiés dans cet échantillon permettent ainsi de définir un climat optimal à l'accroissement de la rainforest, avec un maximum d'humidité et de chaleur enregistré.

### III – De 431 à 429 cm de profondeur

Dans ces deux échantillons, très peu de grains ont pu être comptés. Cependant, une quasi-absence de matériel sporo-pollinique ne signifie pas que la végétation était rare à cette période. Il est bien plus probable qu'après s'être déposés, les grains de pollen et les spores n'ont pas été conservés. Ainsi, des taxons de mangrove, témoin d'une végétation plutôt locale, ont été retrouvés en majorité dans ces lames. Afin de pouvoir reconstituer l'environnement et le climat de cette période, nous disposons des résultats de la sédimentologie, de l'étude des ostracodes et des diatomées, synthétisés dans l'article de Wirrmann et al (2011 – fig.17).

A cette profondeur, les argiles riches en matières organiques sont remplacées par un gel bactérien. Ce dernier, appauvrit en minéraux argileux (Al, Fe, Ti, Ca et Si), s'est déposé en milieu oxydant (présence de bactéries aérobies). Or, les grains de pollen se conservent beaucoup mieux dans un sédiment réducteur que dans un sédiment oxydé. De plus, un milieu aérobie marque une faible présence d'eau. Une forte baisse du niveau du lac a dû se produire à cette période, favorisant l'érosion des sédiments. Ainsi, même si des grains de pollen ont pu se conserver dans un sédiment oxydé, ils ont été emportés par des facteurs d'érosion tels que l'eau ou le vent. Enfin, ce gel bactérien présente une grande densité sèche, témoin d'un assèchement global de l'environnement.



immédiatement. La flore va plutôt être modifiée progressivement, en fonction des nouvelles conditions environnementales. Ainsi, la colonisation totale du marais par les Cyperaceae nécessitant une longue période, la proportion de ce taxon va continuer à augmenter dans les échantillons suivants.

De même que si la rainforest subit une réduction, celle-ci reste encore très présente à cette période. Cependant, elle commence à laisser la place à la forêt ouverte, qui se diversifie. Cette seconde forêt est composée, entre autres, de Sapindaceae, Rutaceae, Loganiaceae, Urticaceae et Moraceae, plantes supportant une relativement faible humidité, ainsi que de *Mallotus*, qui est une plante pionnière, poussant dans des milieux perturbés. Ces taxons sont donc des indicateurs d'un climat plus sec et d'une substitution progressive par des végétaux colonisant des milieux dégradés.

#### V – De 428 à 427 cm de profondeur

La tendance observée dans l'échantillon précédent est attestée par ce nouvel enregistrement pollinique. Le pourcentage d'arbres continue de diminuer, jusqu'à atteindre sa valeur la plus basse, au profit des fougères et des herbacées. En plus du développement des Cyperaceae, des grains de Poaceae apparaissent dans les sédiments, témoins d'une ouverture du paysage.

La végétation de mangrove et de littoral diminue fortement à cette période. L'éloignement constant du front de mer peut être dû à des mouvements tectoniques. En effet, des soulèvements brusques se sont produits à Efaté au cours de l'Holocène (Lecolle et al, 1990). Il est donc possible qu'autour de 3500-3000 ans B.P., une surrection de la côte Sud d'Efaté se soit déclenchée, tout comme sur l'île de Malo à la même période (Pineda et Galipaud, 1998). Ainsi, le cimetière de Téouma, retrouvé dans du beach rock, est aujourd'hui à 800 mètres de la mer (Bedford et al, 2007), témoin d'un éloignement du rivage depuis cette époque.

La forêt ouverte poursuit son accroissement et de nouveaux taxons émergent : Ulmaceae, *Macaranga* et *Claoxylon* par exemple. Ces deux derniers genres correspondent aussi à des plantes pionnières. Au contraire, la rainforest n'est plus composée que de quelques taxons, dominée par les Cunoniaceae et les Podocarpaceae. De plus, les grains de pollen de Podocarpaceae possédant des ballonnets, ils peuvent être transportés sur de grandes distances et pourraient donc ne pas être représentatifs de l'environnement régional. L'analyse pollinique de cet échantillon confirme l'installation d'un climat relativement sec.

#### VI – De 427 à 426 cm de profondeur

A cette période, les herbacées, constitués à nouveau uniquement par la famille des Cyperaceae, atteignent leur plus haut pourcentage, au dépend des taxons d'arbres et des fougères. Ces herbacées présentent alors une expansion maximale au niveau du marais.

Les taxons caractéristiques de la forêt ouverte poursuivent leur progression, et de nouveaux groupes viennent enrichir cet environnement. La forêt ouverte parvient alors à son développement optimal, tandis que la rainforest affiche sa plus faible présence enregistrée dans les sédiments étudiés. Cet assèchement régional, de plus en plus perceptible dans l'évolution de la végétation, a probablement comme origine le renforcement du phénomène El Niño, qui s'est produit durant cette période (Moy et al, 2002). Ce phénomène est en effet la première cause de variabilité climatique dans le

Pacifique Ouest (Moy et *al*, 2002) : en situation El Niño, les vents d'Est sont plus faibles, voire inexistant, et l'humidité moins importante.

Cependant, la diversité des taxons pionniers peut suggérer l'existence d'un autre agent capable de modifier l'environnement. En effet, des genres comme *Macaranga*, *Homalanthus* et *Mallotus* sont non seulement capables de se développer dans des milieux perturbés naturellement, mais aussi près des zones cultivées ou dans des champs abandonnés (Yassir et *al*, 2010). Ces végétaux pourraient donc être des témoins de la présence de l'Homme sur ce site à cette époque.

## VII – De 426 à 425 cm de profondeur

Dans ce dernier échantillon, la forêt progresse à nouveau, comme le démontre les valeurs croissantes des arbres au profit des herbacées et des fougères. Une petite fermeture du milieu est observée, bien que des Poaceae et des Convolvulaceae, preuves d'un environnement plutôt ouvert, soient toujours présents.

Le nombre d'herbacées de marécages décroît légèrement, témoignant d'une remontée du niveau du lac. Inversement, la quantité de grains de pollen de mangrove et de littoral augmente. Cependant, cette faible hausse ne correspond pas nécessairement à une élévation du niveau marin. En effet, les grains de pollen produits par de la végétation de bord de mer peuvent être facilement transportés par les courants marins et les cours d'eau (Sun et *al*, 1999). Par conséquent, malgré un éloignement de la mer, des grains peuvent toujours être acheminés jusqu'au site où ont été prélevés les sédiments.

Bien que la forêt ouverte reste à cette période l'environnement dominant, celle-ci se réduit, et les Moraceae, taxon supportant une relativement faible humidité, disparaissent. D'autres familles, appartenant à la rainforest, sont de nouveau observables en proportions notables, indiquant un retour à une plus grande humidité. À partir de ces résultats, deux hypothèses peuvent être formulées. Soit il s'agit d'une simple oscillation du climat, et les prochains échantillons valideront cette hypothèse si la forêt ouverte reprend son développement. Au contraire, s'il s'agit d'une stabilisation climatique, les prélèvements suivants présenteront des proportions de rainforest et de forêt ouverte semblables, voire supérieures à celles de cet échantillon.

De plus, bien que la plupart des taxons de forêt ouverte déclinent, les genres *Macaranga* et *Mallotus* continuent leur progression. Ces deux taxons, et notamment *Macaranga*, caractérisent les milieux très dégradés et ouverts (Ferry Slik et *al*, 2003). Or, la recolonisation de l'environnement par la rainforest correspond à une fermeture du milieu. Ces plantes pionnières devraient donc laisser place aux espèces de rainforest. La présence de *Macaranga* et de *Mallotus* n'est pas due au regain d'humidité, mais pourrait être expliquée par l'arrivée de l'Homme et l'exploitation de son environnement pour la production de nourriture.

---

## Conclusion

---

Vers 3500 ans B.P, d'importantes modifications environnementales ont pu être identifiées sur la côte Sud d'Efaté. Un abaissement du niveau marin, provoqué par des mouvements tectoniques liés à la marge convergente du Vanuatu, a éloigné la mangrove du site d'Emaotfer. Un brusque assèchement du climat a permis le remplacement d'une rainforest et d'un lac assez profond par un marais ainsi qu'une forêt ouverte, composée de taxons pionniers et de taxons supportant une relativement faible humidité. Ce bouleversement est marqué par une subite diminution du niveau du lac (voire une disparition du lac), résultant de l'appauvrissement des grains de pollen dans deux lames successives. A l'origine de ce changement, vraisemblablement un renforcement du phénomène El Niño.

Cette situation a pu être favorable à des migrations humaines. En période El Niño, nous l'avons vu, les vents d'Est s'affaiblissent ou sont substitués par des vents d'Ouest, facilitant ainsi la navigation à voile vers les archipels situés à l'Est de la Nouvelle-Guinée (Anderson *et al*, 2006). De plus, l'importante sécheresse présente à l'Ouest du Pacifique a dû pousser les populations à se déplacer vers l'Est, où le climat était un peu plus humide (Kirch, 2000). Dans les échantillons étudiés les plus récents, des traces indirectes d'activités anthropiques ont d'ailleurs été supposées.

Effectivement, une détérioration de la végétation sur des îles peuplées pendant l'Holocène récent peut être une preuve de l'arrivée de l'Homme (Prebbles et Wilmshurst, 2009). Cependant, il est très difficile de définir la cause d'une perturbation de l'environnement dans la région du Pacifique Sud (Numn, 1997 ; Numn, 2003), les populations de cette zone cultivant principalement des tubercules. Or, les grains de pollen de tubercules sont rarement retrouvés dans les sédiments, les fleurs de ces plantes étant coupées, afin de favoriser la croissance des rhizomes. Ainsi, ce sont surtout des traces indirectes d'activité anthropiques qui sont exploitées afin de d'étayer la présence de l'Homme. Mais l'analyse de ces traces demande de la prudence, puisque des charbons de bois retrouvés en grande quantité, ou des taxons pionniers déterminés dans des sédiments peuvent être les témoins d'une perturbation anthropique, naturelle, ou des deux agents agissant conjointement.

Une analyse palynologique à haute résolution a pour avantage de permettre une restitution des petites variations de l'évolution de l'environnement. Ainsi, la légère reprise d'un développement de la rainforest dans le dernier échantillon questionne : est-ce un retour à un climat plus humide qui va perdurer ou est-ce juste une hausse d'humidité avant une recrudescence de la sécheresse ? Pour répondre à ces interrogations, il faudra poursuivre les recherches sur les prélèvements suivants.

A ce jour, peu d'études paléoenvironnementales ont été réalisées dans l'archipel du Vanuatu (Cabioch *et al*, 2008). Seules quelques analyses palynologiques ont été effectuées, dans le cadre de recherches sur la préhistoire. Mais l'ensemble des connaissances obtenues ne suffit pas pour reconstituer l'évolution des paysages du Vanuatu de façon fiable. Il est donc important de continuer les travaux archéologiques et paléoenvironnementaux, d'autant plus que certaines îles du Pacifique sont menacées par la montée des eaux dues au réchauffement climatique, et leur patrimoine culturel risque de disparaître.

## Bibliographie

- Anderson, A., Chappell, J., Gagan, M.K., Grove, R., 2006. Prehistoric maritime migration in the Pacific islands : an hypothesis of ENSO forcing. *Holocene* 16, 1-6.
- Anderson, A., Gagan, M., Shulmeiste, J., 2007. Mid-Holocene cultural dynamics and climatic change in the Western Pacific. In : Anderson, D.G, Maasch, K.A., Sandweiss, D.H (Ed.), *Climate change and cultural dynamics*, Elsevier, Oxford, pp. 265-297.
- Ash, R.P., Carney, J.N., Macfarlane, A., 1978. *Geology of Efate and offshore islands*, New Hebrides Gvnl Geological Survey , Port-Vila, 49p.
- Ash, R.P., Radford, N.W., Greenbaum, D., Mallick, D.I.J., 1967. *Geology of Efate and offshore islands*, 1:100,000 New Hebrides Geological Survey Sheet 9, Directorate of Overseas Surveys, Tolworth.
- Backer, C.A., Van Den Brink, B., Brink, R., 1965. *Flora of Java (Spermatophytes only)*, Noordhoff, Groningen, 641p.
- Bedford, S., Spriggs, M., Regenvanu, R., 2006. The Teouma Lapita site and the early human settlement of the Pacific Islands. *Antiquity* 80, 817-828.
- 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 Asutralia* 26, 223-239.
- 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.
- Beucher, F., Belamari, S., Beau, I., 2011. *Météorologie Tropicale : des alizés au cyclone*, Météo France, Paris, 865p.
- Bulalacao, L.J., 1997. *Pollen Flora of the Philippines*, National Museum Philippines and Research Council of the Philippines, Manille, 266p.
- Bunting, M.J., 2003. Pollen-vegetation relationships in non-arboreal moorland taxa. *Review of Palaeobotany and Palynology* 125, 285-298.
- Cabalion, P., Lebot, V., 1986. *Les kavas du Vanuatu : cultivars de Piper methysticum* Forst, ORSTOM, Paris, 234p.
- 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. *Journal de la Société des Océanistes* 126-127, 25-40.
- Chacornac-Rault, M., 2005. *Etudes palynologique et paléoenvironnementale de sondages holocènes dans les Gunung Sewu (Java, Indonésie) : reconstitution de l'environnement, impacts climatiques et anthropiques, mise en évidence de la néolithisation*, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 212p.
- 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, 570-579.
- Erdtman, G., 1966. *Pollen morphology and plant taxonomy*, Hafner Publishing compagny, New-York, 553p.
- Ferry Slik, J.W., KeBüler P.J.A., 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, 310-324.

- Haberle, S., Rowe, C., Hungerford, S., Preston, T., Warren, P., Hope, G., Hopf, F., Thornhill, A., Stevenson, J., Weng, C., Shimeld, P., Bowman, D., Van Der Kaars, S., Sniderman, K., 2007. Australasian Pollen and Spore Atlas, Australian National University, Canberra. <http://apsa.anu.edu.au/>
- Heywood, V.H., Moore, D.M., Richardson, I.B.K., Stearn, W.T., 1996. Les plantes à fleurs : 306 familles de la flore mondiale, Nathan, Paris, 335p.
- Kaltenrieder, P., Von Ballmoos, P., 2003. Introduction to Pollen Analysis, University of Berne, Berne. [http://www.botany.unibe.ch/paleo/pollen\\_e/index.htm](http://www.botany.unibe.ch/paleo/pollen_e/index.htm)
- Kirch, P.V., 1988. The Talepakemalai Lapita site and Oceanic prehistory. *National Geographic Research* 4, 328-342.
- Kirch, P.V., 1997. The Lapita peoples : ancestors of the oceanic world, Blackwell publisher, Cambridge, 353p.
- Kirch, P.V., 2000. On the Road of the Winds. An Archaeological History of the Pacific Islands before European Contact, University of California Press, Berkeley-Los Angeles-London, 424p.
- Laborde, H., 2010. Universal Pollen Collection, Institut des Sciences de l'évolution, Montpellier. <http://www.palyno.org/Pollen/>
- Lecolle, J.F., Bokilo, J.E., Bernat, M., 1990. Soulèvement et tectonique de l'île d'Efaté (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, IRD, Saint Rémy lès-Chevreuse, 112p.
- Mahiques, M.M., Tolentino, C.V., Vilalta, L.E., 1989. Development of a portable vibratory corer. *Brazilian Journal of Oceanography* 37, 75-81.
- Mallick, D.I.J., 1975. Development of the New Hebrides Archipelago. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences* 272, 277-285.
- Maloney, B.K., 1984. Man's Impact on the Rainforests of West Malesia: The Palynological Record. *Journal of Biogeography* 12, 537-559.
- Misset, M.T., Gourret, J.P., 1989. Voir, connaître et utiliser le pollen, INRAP, Dijon, 80p.
- 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., Labat, J.N., 2011. Principal types of vegetation occurring on Santo. In Bouchet, P., Le Guyader, H., Pascal, O. (Ed), *The natural history of Santo*, MNHN;IRD;Pro-Natura International, Paris, 76-88.
- Numn, P.D., 1997. Late Quaternary environmental changes on Pacific islands: controversy, certainty and conjecture. *Journal of Quaternary Science* 12, 443-450.
- Numn, P.D., 2003. Nature - society interactions in the Pacific islands. *Geografiska Annaler* 85, 219-229.
- Pelletier, B., 2009. Cadre structural de l'Archipel du Vanuatu. In Siméoni, P. (Ed.), *Atlas du Vanouatou (Vanuatu)*, Géo-Consulte, Port-Vila, pp. 103-196.
- 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 - Earth and Planetary Science* 327, 777-779.
- Prebble, M., Wilmschurst, J.M., 2008. Detecting the initial impact of humans and introduced species on island environments in Remote Oceania using palaeoecology. *Biological Invasion* 11, 1529-1556.

- Punt, W., Hoen, P., Blackmore, S., Nilsson, S., Le Thomas, A., 2007. Glossary of pollen and spore terminology. *Review of Palaeobotany and Palynology* 143, 1-81.
- Renault-Miskovsky, J., Petzold, M., 1992. *Spores et Pollen*, Delachaux et Niestlé, Lonay, 360p.
- Sam, C., Walter, A., Bataille, M.C., Bompard, J.M., Bonnemère, P., Tcherkesoff, S., 1999. *Fruits d'Océanie*, IRD, Paris, 310p.
- Schmid, M., 1987. Conditions d'évolution et caractéristiques du peuplement végétal insulaire en Mélanésie occidentale : Nouvelle-Calédonie, Vanuatu. *Bulletin de la Société Zoologique de France* 112, 233-254.
- Sémah, A.M., Sémah, F., Guillot, C., Djubiantono, T., Fournier, M., 1992. Etude de la sédimentation pollinique durant les quatre derniers millénaires dans le bassin d'Ambarawa (Java Central, Indonésie) - Mise en évidence de premiers défrichements. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 315, 903-909.
- Sémah, A.M., 2003. Exemple d'endémisme et de diversité dans la flore pollinique des îles du Pacifique. In Orliac, C. (Ed.), *Archéologie en Océanie Insulaire : peuplement, sociétés et paysages*, Artcom, Paris, pp. 113-130.
- Sémah, A.M., Renault-Miskovsky, J., Cheddabi, R., Chepstow-Lusty, A., Jolly, D., Lebreton, V., Ledru, M.P., Maley, J., Scott, L., Van Campo, E., Le Thomas, A., 2004. L'évolution de la végétation depuis deux millions d'années, Artcom, Paris, 315p.
- Sémah, A.M., Déroit, F., 2006. Sur les premiers peuplements du Pacifique sud. *Comptes Rendus Palevol* 5, 381-393.
- Sémah, A.M., Wirmann, D., 2006. *Mission Vanuatu*, IRD, Nouméa, 80p.
- Siméoni, P., 2009. La Végétation du Vanuatu. In Siméoni, P. (Ed.), *Atlas du Vanouatou (Vanuatu)*, Géo-Consulte, Port-Vila, pp. 176-182.
- 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.
- Sun, X., Li, X., Beug, H.J., 1999. Pollen distribution in hemipelagic surface sediments of the South China Sea and its relation to modern vegetation distribution. *Marine Geology* 156, 211-226.
- Tomlinson, P.B., 1986. *The Botany of Mangroves*, Cambridge University Press, Cambridge, 413p.
- Tsonis, A.A., 2009. Dynamical changes in the ENSO system in the last 11,000 years. *Climate Dynamics* 33, 1069-1074.
- Valentin, F., Herrscher, E., Buckley, H., Bedford, S., Spriggs, M., Neal, K., 2009. Human diet in the Lapita community of Teouma (Vanuatu): Carbon and nitrogen stable isotopes evidence. *Journal of Comparative Human Biology* 60, 260-261.
- Valentin, F., Buckley, H.R., Herrscher, E., Kinaston, R., Bedford, S., Spriggs, S., Hawkins, S., Neal, K., 2010. Lapita subsistence strategies and food consumption patterns in the community of Teouma (Efate, Vanuatu). *Journal of Archaeological Science* 37, 1820-1829.
- Van Dam, H., Mertens, A., Sinkeldam, J., 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Aquatic Ecology* 28, 117-133.
- Wheatley, J.I., 1992. *A Guide to the Common Trees of Vanuatu*, Republic of Vanuatu's Department of Forestry, Port-Vila, 307p.
- Wirmann, D., Eagar, S.H., Harper, M.A., Leroy, E., Sémah, A.M., 2011. First insights into mid-Holocene environmental change in central Vanuatu inferred from a



- terrestrial record from Emaotfer Swamp, Efaté Island. *Quaternary Science Reviews* 30, 3908-3924.
- Wyrтки, K., 1973. Teleconnections in the Equatorial Pacific Ocean. *Science* 180, 66-68.
- Wyrтки, K., 1975. El Niño—The Dynamic Response of the Equatorial Pacific Ocean to Atmospheric Forcing. *Journal of Physical Oceanography* 5, 572-584.
- Yassir, I., Van der Kamp, J., Buurman, P., 2010. Secondary succession after fire in Imperata grasslands of East Kalimantan, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 137, 172-182.