



HAL
open science

Signal pollinique et climat de mousson en Inde du Sud

Doris Barboni

► **To cite this version:**

Doris Barboni. Signal pollinique et climat de mousson en Inde du Sud. Sciences de l'environnement. UNIVERSITE DE DROIT, D'ECONOMIE ET DES SCIENCES D'AIX-MARSEILLE, 2000. Français. NNT: . tel-04546969

HAL Id: tel-04546969

<https://hal.science/tel-04546969>

Submitted on 15 Apr 2024

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.

Copyright

UNIVERSITE DE DROIT, D'ECONOMIE ET DES SCIENCES D'AIX-MARSEILLE III

N° attribué par la bibliothèque : 00AIX30080

TITRE

SIGNAL POLLINIQUE ET CLIMAT DE MOUSSON EN INDE DU SUD

THESE

Pour obtenir le grade de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE DROIT, D'ECONOMIE ET DES SCIENCES D'AIX-MARSEILLE

Discipline : Géosciences de l'environnement

Spécialité : Palynologie et Paléoclimatologie

Présentée et soutenue publiquement par

BARBONI Doris

le 9 novembre 2000

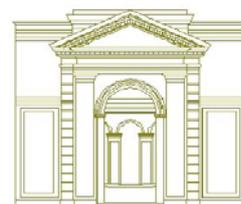
Directeur de Thèse : Dr Raymonde Bonnefille

JURY

Mlle Raymonde BONNEFILLE	Directeur de recherches, CNRS, Aix-en-Provence	Directeur de Thèse
Mlle Elise VAN CAMPO	Directeur de recherches, CNRS, Toulouse	Rapporteur
M. Peter KERSHAW	Professeur, Université Monash, Clayton, Australie	Rapporteur
M. Jean-Pierre PASCAL	Directeur de recherches, CNRS, Lyon	Examineur
M. François HOULLIER	Directeur de recherche, CIRAD/INRA, Montpellier	Examineur
M. Dominique JOLLY	Professeur, Université Montpellier II	Examineur
M. Vincent MORON	Maître de Conférence, Université Aix-Marseille I	Examineur



ANNEE : 2000



Institut Français de Pondichéry
11 Saint Louis street
P.O. Box 33
605 001 Pondicherry - INDIA

Résumé

Ce travail étudie la relation entre le signal pollinique des forêts sempervirentes, semi-sempervirentes et décidues du Sud-Ouest de l'Inde et le climat de mousson actuel. L'analyse détaillée de 180 échantillons de surface de sol collectés entre 8°-16°N et entre 0-1400 m d'altitude permet de discriminer 9 des 15 types floristiques distingués par la cartographie végétale. L'interprétation des analyses factorielles indique que les différences de composition entre les spectres polliniques sont le résultat de contraintes climatiques sur la végétation actuelle. Les températures du mois le plus froid de 20°C et 15°C conditionnent l'existence des forêts tropicales de basse, moyenne et haute altitude. La pluviométrie annuelle, inférieure ou supérieure à 2500 mm/an détermine le caractère décidu ou sempervirent de la végétation. L'impact du stress hydrique induit par la saison sèche et évalué par le coefficient d'humidité E/PE, a aussi été étudié. Les valeurs 65% et 75% de E/PE définissent l'espace climatique de différents sous-types de végétations sempervirentes et décidues. Ces nouveaux seuils climatiques, responsables de changements importants dans la composition de la pluie pollinique et dans la végétation, seront intégrés dans une prochaine version du modèle de BIOME. Nos recherches sur l'Inde contribuent donc à l'amélioration des modèles de végétation pour les régions tropicales. De plus, les données quantitatives actuelles de 30 taxons polliniques marqueurs de la température, 23 de la pluviométrie et 39 du coefficient d'humidité ont permis d'élaborer par régression multiple, des fonctions de transfert Pollen - Climat. Une application à deux carottes de la Mer d'Arabie, indique une pluviométrie réduite de moitié, un stress hydrique augmenté de 20% et une température réduite de 2°C pendant le Maximum Glaciaire aux latitudes 13°-15°N, en accord avec les fluctuations modélisées de la mousson passée.

Abstract

This study investigates the relationship between the pollen signal of evergreen, semi-evergreen and deciduous forests in southwest India and the current monsoon climate. Detailed analysis of 180 soil surface samples collected between 8°-16°N and 0-1400 m altitude enables us to discriminate 9 of the 15 floristic types distinguished by plant mapping. Interpretation of the factorial analyses indicates that the differences in composition between the pollen spectra are the result of climatic constraints on the current vegetation. Temperatures of 20°C and 15°C in the coldest month condition the existence of low-, medium- and high-altitude tropical forests. Annual rainfall, below or above 2,500 mm/year, determines whether vegetation is deciduous or evergreen. The impact of water stress induced by the dry season and assessed by the humidity coefficient E/PE, was also studied. E/PE values of 65% and 75% define the climatic space for different subtypes of evergreen and deciduous vegetation. These new climatic thresholds, responsible for significant changes in pollen rain composition and vegetation, will be incorporated into a future version of the BIOME model. Our research on India thus contributes to the improvement of vegetation models for tropical regions. In addition, current quantitative data on 30 pollen taxa as markers of temperature, 23 of rainfall and 39 of humidity coefficient have been used to develop Pollen-Climate transfer functions by multiple regression. An application to two cores from the Arabian Sea indicates a 50% reduction in rainfall, a 20% increase in water stress and a 2°C reduction in temperature during the Glacial Maximum at latitudes 13°-15°N, in line with modelled fluctuations in the past monsoon.

Remerciements

Ce mémoire est la synthèse de mes travaux réalisés à l'Institut Français de Pondichéry (Inde) et au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE, Université d'Aix - Marseille III, France). J'ai bénéficié durant trois ans d'une allocation de recherche de l'Institut Français de Pondichéry.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement ma directrice de thèse Mlle Raymonde Bonnefille, qui m'a fait découvrir la palynologie et qui depuis bientôt plus de quatre ans suit mes travaux de recherche. Grâce à ses conseils avisés, prodigués depuis la rédaction d'un article à la suite du DEA, jusqu'à l'aboutissement de cette thèse de Doctorat, ainsi que sa présence constante lors de chaque étape importante, sa patience et sa curiosité scientifique, elle a su, je pense, me transmettre sa rigueur de travail et de raisonnement. En Inde, son expérience du terrain m'a permis d'appréhender le milieu d'un œil avisé et de comprendre que la plupart de nos interrogations trouvent souvent réponse lorsque les observations de terrain ont été réalisées avec soin. Sans elle, ce travail n'aurait pu être mené à bien. Au-delà de ces compétences intellectuelles et scientifiques, je voudrais remercier Raymonde en tant qu'amie, pour son extrême humanité qu'elle aura su donner tout au long de cette collaboration.

Je tiens également à remercier les directeurs de l'Institut Français de Pondichéry, M. François Houllier, Directeur de l'Institut lors de mon arrivée en 1997, et M. Denis Depommier pour m'avoir accueilli dans leur structure et avoir gracieusement accepté de financer mes travaux pendant trois ans. Je les remercie également d'avoir mis à ma disposition tous les moyens matériels de l'Institut pour que je puisse mener à bien à la fois les missions de terrain et ma recherche. Je remercie tout particulièrement M. François Houllier, actuellement directeur de l'UMR CIRAD/INRA Modélisation des plantes (AMAP) de Montpellier, pour avoir accepté de faire partie de mon Jury de thèse.

Je remercie les membres du Jury, pour avoir répondu favorablement à l'invitation qui leur a été faite.

Un grand merci à M. Peter Kershaw, Professeur à l'Université Monash de Clayton (Australie) et Mme Elise Van Campo, Directrice de recherches au Laboratoire d'Ecologie Terrestre à l'Université Paul Sabatier (Toulouse), pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Je remercie également M. Jean-Pierre Pascal, Directeur de Recherches au Laboratoire de Biométrie, Génétique et Biologie des Populations de l'Université Claude Bernard (Lyon), et M. Dominique Jolly, Professeur au Département de Paléoenvironnements et Palynologie de l'Université de Montpellier II, d'avoir accepté de juger mon travail et de participer à cette soutenance. Je les remercie aussi tous deux, pour les discussions scientifiques que nous avons eues au cours de ce travail de thèse.

Je remercie sincèrement Joël Guiot, Directeur de recherches à l'IMEP de l'Université de Aix- Marseille III, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa sympathie et surtout pour son aide efficace lors du traitement des données météorologiques. Je lui

suis reconnaissante de m'avoir accueilli à tout moment dans son laboratoire et d'avoir répondu à mes nombreuses questions concernant les statistiques.

Au Laboratoire de Palynologie de l'Institut Français de Pondichéry, je ne remercierai jamais assez Prasad S. pour sa patience lors de mon apprentissage à la reconnaissance des pollens. Il m'a été d'une aide incontestée lors du comptage des échantillons polliniques et je tiens à lui exprimer ma plus profonde considération. Je tiens également à remercier Sabaraj S. et Ramakrishnan G. pour avoir fait les préparations chimiques des échantillons et Arumugam P. pour avoir compiler les données météo. Merci à Anupama K., pour les nombreuses discussions que nous avons eues et les bons moments passés à découvrir les statistiques et avec qui j'aurai l'occasion de travailler encore pour le projet INDSUBIO,

A l'Institut Français de Pondichéry, je tiens aussi à remercier chaleureusement mon collègue et ami Jishnu Gupta, un informaticien hors pair qui a su m'initier à l'utilisation d'ACCESS et qui a su écouter mes nombreuses requêtes lors de la construction de la base de données Pollens des Ghâts occidentaux. Sans lui, le maniement des données polliniques et climatiques acquises au cours de ce travail n'aurait pu être fait aussi facilement. Il ne s'est pas passé un jour sans que j'utilise cette base de données et j'espère qu'il trouvera ici l'expression de ma reconnaissance.

Au Laboratoire de Géomatique, je tiens à remercier les responsables Sonia Darracq et Marie-Claire Guéro, pour m'avoir permis de profiter des compétences cartographiques de Sébastien Salvador et de Renaud Michon. Merci à Sébastien et Renaud pour certaines réalisations graphiques de ce mémoire.

A l'Institut de Pondichéry, je tiens à remercier aussi mes amis Muriel Durand, Yves Caraglio, et Etienne Delattre, pour m'avoir initié aux « dangers » et duretés du terrain lors de mes deux premières missions dans les forêts à sangsues, tiques, scorpions, serpents, scolopendres, tigres, panthères, ours, singes ... des Ghâts ! Merci aussi aux techniciens botanistes Aravaji et Ravi et aux chauffeurs expérimentés Gopal, Kanagu et Adimulam qui m'ont accompagné sur le terrain.

Je tiens également à remercier du fond du cœur mes collègues et amis de Pondichéry, Sébastien Salvador, Laurent Caner, Etienne Delattre, Mohan Seetharam, Muriel Durand, Puja Batra, Jonhsi Nagaradjan, Fili d'Auro, Ratan Datta, Raffi, Béatrice Moppert, Fabienne Venou, Alexandra Quien, Thomas Bouix, Guillaume, David, Myriam, Dominique, Amhed, Gersendre, Virginie, Amir, Jérôme, Shridar, Herbert l'Ougandais, Meena le Maître Yogi pour leur soutien constant, leur joie de vivre et les bons moments que l'on a passé tous ensemble. Merci aussi à Seth et ses enfants sans qui ces 3 années à Pondichéry n'auraient jamais été aussi douces.

Au CEREGE, je remercie Guy Riollet, Guillaume Buchet et Annie Vincent pour nos petites discussions « polliniques » et leur bonne humeur. Merci aussi à tous les étudiants thésards et ex-thésards du CEREGE en particulier mes deux collègues de bureau François Sabatier et Jean-Philippe Goiran pour m'avoir soutenu par leurs constants encouragements et avoir supporté mes coups de blues de fin de thèse !

Table des matières

Remerciements.....	I
Table des matières.....	III
Liste des Figures.....	V
Liste des Tableaux.....	VII
Liste des Annexes.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
• Problématique, objectifs et choix de la région étudiée	1
• Les stratégies adoptées	4
• Le plan du mémoire.....	4
CHAPITRE I. PRESENTATION DU MILIEU.....	7
1. Cadre géographique.....	7
2. Climat de mousson.....	9
2.1. Définition et caractéristiques	9
2.2. Mécanismes physiques	10
• Le réchauffement différentiel	10
• Les processus humides	11
• L'impact de la rotation de la terre.....	11
2.3. Variabilité.....	12
2.4. Mousson en Inde du Sud	13
2.5. Bioclimats.....	14
3. Végétation.....	16
3.1. Forêts sempervirentes.....	17
• Distribution géographique et climatique.....	17
• Physionomie	17
• Composition floristique	18
3.2. Forêts décidues	23
• Distribution géographique et climatique.....	23
• Physionomie	24
• Composition floristique	24
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	25
1. Données polliniques actuelles.....	25
1.1. Choix des sites.....	25
• D'après la cartographie végétale	25
• D'après la cartographie des bioclimats.....	26
1.2. Méthode d'échantillonnage	28
1.3. Traitements des échantillons et comptages.....	28
1.4. Traitements statistiques des données	29
2. Données climatiques.....	29
2.1. Description des fichiers de données	31
• Les données de l'IFP	31
• Les données du fichier global.....	31
2.2. Méthode d'interpolation du climat aux sites polliniques.....	32
• Utilisation des réseaux neuronaux artificiels	32
2.3. Choix des paramètres climatiques pour l'Inde du Sud	34
• Température.....	34
• Précipitations	35
• Coefficient d'humidité E/PE.....	37
2.4. Répartition des spectres dans les domaines climatiques.....	38

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION.....	43
1. Pluie pollinique actuelle et climat	43
• AFC sur l'ensemble du dataset	43
• AFC sur le dataset restreint	47
1.1. Pluie pollinique actuelle et gradient de température.....	50
• Article à Journal of Biogeography (1999).....	50
1.2. Pluie pollinique actuelle et gradient de pluviométrie.....	52
• Article à Review of Palaeobotany and Palynology (<i>soumis</i>).....	53
1.3. Pluie pollinique actuelle et longueur de la saison sèche	79
• Article à Journal of Vegetation Science (<i>soumis</i>).....	80
2. Pluie pollinique actuelle et végétation.....	116
2.1. Signature pollinique des types de végétation.....	116
• Forêts sempervirentes (Figure III.7).....	116
• Forêts semi-sempervirentes (Figure III.8).....	121
• Formations secondaires (Figure III.9).....	123
• Formations décidues (Figure III.10).....	125
2.2. Caractéristiques de la pluie pollinique.....	128
• Biais de la pluie pollinique tropicale	128
• Richesse taxonomique et richesse floristique	130
• Proportion des AP et densité du couvert arboré.....	134
• Proportion de taxons sempervirents/décidus et phénologie.....	137
Synthèse : Relation Pollen / Végétation / Biomes.....	140
• Conclusions sur la relation Pollen – Végétation tropicale	140
• Conclusions sur la relation Pollen – Biomes tropicaux	144
CHAPITRE IV. RECONSTRUCTIONS CLIMATIQUES.....	149
1. Fonction de transfert POLLEN – TEMPERATURE.....	151
1.1. Domaine d'application	151
1.2. Taxons polliniques marqueurs de température	152
1.3. Résultats de la calibration et discussion	155
2. Fonction de transfert POLLEN – PRECIPITATION	157
2.1. Domaine d'application	157
2.2. Taxons polliniques marqueurs de pluviosité	158
2.3. Résultats de la calibration et discussion	159
3. Fonction de transfert POLLEN – SAISONNALITE des précipitations (E/PE)	161
3.1. Domaine d'application	161
3.2. Taxons polliniques marqueurs.....	161
3.3. Résultats de la calibration et discussion	163
Conclusion : application à des spectres fossiles	165
• Carottes en Mer d'Arabie (SK128A-30 et -31).....	166
• Carottes au large de la Papouasie -Nouvelle Guinée (MD97-2134).....	174
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	181
Références bibliographiques.....	183

Liste des Figures

Figure I.1 : Hypsométrie des Ghâts occidentaux, Inde du Sud et localisation des sites polliniques actuels.....	8
Figure I.2 : Domaines des principaux systèmes atmosphériques de la mousson durant l'hiver austral (a) et l'hiver boréal (b) (tiré de Webster, 1987).....	10
Figure I.3 : Coupes représentant la circulation atmosphérique le long du méridien 90°E durant l'été boréal en Asie du Sud. La position du point d'insolation maximale est marquée par une flèche (Smax). Les barres représentent les zones de précipitations maximales (d'après (Webster, 1987).	12
Figure I.4 : Distribution spatiale des anomalies de pluviométrie en pourcentage d'écart par rapport à la moyenne, pendant les périodes de mousson déficitaires (a) et excédentaires (b) en Inde (d'après (Kulkarni and Kripalani, 1998).	13
Figure I.5 : Bioclimats des Ghâts occidentaux (Pascal, 1982).	15
Figure I.6 : Profils topographiques de direction Sud –nord a) versant occidental, b) versant oriental, représentant la répartition des types floristiques sempervirents <i>sensu largo</i> en fonction de la latitude et de l'altitude (reproduit d'après (Ramesh and Pascal, 1997)).	21
Figure I.7 : Profil topographique Ouest – Est dans les Ghâts occidentaux à la latitude 12°20'N, montrant la distribution spatiale des types sempervirents et décidus (d'après la carte de végétation Mercara-Mysore – Pascal et al., 1982b).	23
Figure II.1 : Distribution des échantillons collectés et des spectres polliniques obtenus en fonction des types de végétation échantillonnés.....	26
Figure II.2 : Distribution des 180 spectres polliniques actuels en fonction de classes altitudinales.	26
Figure II.3 : Localisation des stations météorologiques IFP et LC ayant fourni les données pour l'interpolation du climat aux sites polliniques actuels des Ghâts occidentaux, Inde du Sud.	30
Figure II.4 : Corrélation et résidus entre les valeurs de température du mois le plus froid (MTCO) observées et interpolées, pour les 34 stations thermiques ayant servi à la calibration.	35
Figure II.5 : Distribution des précipitations sur l'année observées et interpolées, pour trois stations soumises à des régimes pluviométriques différents.	36
Figure II.6 : Corrélation et résidus entre les valeurs observées et interpolées, pour les 74 stations pluviométriques utilisées pour la calibration des précipitations avec distinction des régimes pluviométriques.	36
Figure II.7 : Corrélation et résidus entre les valeurs du coefficient d'humidité observées et interpolées, pour les 14 stations fournissant les données d'ensoleillement.	38
Figure II.8 : Distribution des 180 spectres actuels en fonction de classes de Température interpolée (TANN, Température annuelle, °C et MTCO, Température Moyenne du mois le plus froid, °C).	39
Figure II.9 : Distribution des 180 spectres polliniques actuels en fonction de classes de pluviométrie annuelle (PANN, mm/an) interpolée.	39
Figure II.10 : Distribution des 180 spectres actuels en fonction de classes de E/PE (%) interpolé.	40
Figure II.11 : Distribution des 180 sites polliniques dans les domaines climatiques définis par (Whittaker, 1975). Relation entre climat et végétation.	41
Figure II.12 : Distribution des 180 sites polliniques dans les domaines de biomes définis par (Prentice <i>et al.</i> , 1992). Les différents signets correspondent aux types de végétation échantillonnés dans les Ghâts occidentaux, Inde du Sud.	42

Figure III.1 : AFC entre 215 spectres et 219 taxons. Dispersion des spectres en fonction des axes factoriels 1 et 2.....	44
Figure III.2 : Dispersion des 215 spectres polliniques en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 1 et de leur altitude respective (a), et de la température du mois le plus froid (MTCO, °C) (b). (Légende : voir Figure III.1).	45
Figure III.3 : Dispersion des 184 spectres polliniques (spectres de shola exclus) en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 2 et de la pluviométrie annuelle interpolée à chacun des sites (PANN, mm/an).....	46
Figure III.4 : AFC entre 184 spectres et 182 taxons. Dispersion des spectres en fonction des axes factoriels 1 et 2. Les groupes IIa et IIb rassemblent les mêmes spectres que dans la figure III.1 .	47
Figure III.5 : Dispersion des 184 spectres polliniques en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 2 et de la température du mois le plus froid interpolée à chacun des sites (MTCO, °C).....	48
Figure III.6 : Distribution des 180 sites polliniques actuels dans les domaines climatiques définis par la pluviométrie moyenne annuelle (PANN, mm/an) et le coefficient d'humidité (E/PE, %). Les sites sélectionnés ont été indiqués.....	52
Figure III.7 : Diagramme de pourcentages des taxons polliniques pour les 65 spectres des forêts sempervirentes de basse (130-900 m) et moyenne altitude (900-1300 m). a) diagramme des AP ; b) diagramme des NC et NAP, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC.	119
Figure III.8 : Diagramme de pourcentages des taxons polliniques AP, NAP et NC, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/ Combretaceae et Moraceae/ Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC, pour les 27 spectres des formations semi-sempervirentes.	122
Figure III.9: Diagramme de pourcentages des taxons polliniques AP, NAP et NC, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/ Combretaceae et Moraceae/ Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC, pour les 28 spectres des formations secondaires.....	124
Figure III.10: Diagramme de pourcentages des taxons polliniques AP, NAP et NC, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/ Combretaceae et Moraceae/ Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC, pour les 50 spectres des forêts décidues sèches et humides des Ghâts occidentaux.....	127
Figure III.11 : Richesse en taxons arborés de la pluie pollinique pour les différents types de formations échantillonnées dans les Ghâts occidentaux.	132
Figure III.12 : Proportion moyenne des taxons arborés (AP, %) en fonction des types de formations. Ici, les taxons Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae ne sont pas considérés.	134
Figure III.13 : Proportion moyenne des pollens de plantes herbacées (NAP), des Poaceae et des arbres et arbustes (AP, Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae exclus), en fonction de la physionomie de la formation végétale échantillonnée.	136
Figure III.14 : Diagramme synthétique des pourcentages de pollens représentant dans la pluie pollinique des plantes sempervirentes ou décidues.	139
Figure III.15 : Subdivisions de la végétation en types floristiques , d'après la classification botanique en vigueur (Pascal <i>et al.</i> , 1982a; Pascal <i>et al.</i> , 1982b; Pascal <i>et al.</i> , 1984; Ramesh <i>et al.</i> , 1998).	142
Figure III.16 : Subdivision de la végétation en pollen-zones , d'après des AFC.....	143

Figure III.17 : Domaines d'existence des différents types de végétations du l'Inde du sud, définis par des seuils climatiques de température (MTCO, °C), pluviométrie (PANN, mm/an) et humidité (E/PE, %).	146
Figure IV.1 : Distribution des 242 spectres polliniques actuels en fonction de l'altitude et de la température du mois la température annuelle (TANN, °C).	152
Figure IV.2 : Significativité statistique des 30 régresseurs de la température, calculée à l'aide du ratio $\frac{\sigma}{S\sigma}$ et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.	154
Figure IV.3 : Corrélation entre températures observées et températures reconstruites pour les 242 sites polliniques (températures moyennes annuelles, TANN, °C), et distribution des résidus. ...	156
Figure IV.4 : Significativité statistique des 23 régresseurs de la pluviométrie annuelle, calculée à l'aide du ratio $\frac{\sigma}{S\sigma}$ et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.	159
Figure IV.5 : Corrélation entre précipitations interpolées (observées) et précipitations reconstruites pour les 180 sites polliniques (précipitations moyennes annuelles, PANN, mm/an), et distribution des résidus.	160
Figure IV.6 : Significativité statistique des 39 régresseurs du coefficient d'humidité E/PE, calculée à l'aide du ratio $\frac{\sigma}{S\sigma}$ et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.	163
Figure IV.7 : Corrélation entre E/PE interpolé et E/PE reconstruit pour les 180 sites polliniques (Coefficient d'humidité, E/PE, %), et distribution des résidus.	164
Figure IV.8 : Localisation géographique des carottes sédimentaires marines en Mer d'Arabie.	166
Figure IV.9 : Diagramme pollinique synthétique et valeurs moyennes annuelles reconstruites de température (TANN, °C), pluviométrie (PANN, cm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) pour la carotte marine SK128A-31.	170
Figure IV.10 : Diagramme pollinique synthétique et valeurs moyennes annuelles reconstruites de température (TANN, °C), pluviométrie (PANN, cm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) pour la carotte marine SK128A-30.	171
Figure IV.11 : Carte de localisation géographique de la carotte MD97-2134.	175
Figure IV.12 : Estimation des valeurs de température moyenne annuelle (TANN, °C), pluviométrie annuelle (PANN, mm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) obtenues par les fonctions de transfert Pollen - Climat, pour les niveaux sédimentaires 859-860 cm et 860-862 cm de la carotte MD97-2134.	177

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Les types floristiques des Ghâts occidentaux (d'après (Pascal <i>et al.</i> , 1982a; Pascal <i>et al.</i> , 1982b; Pascal <i>et al.</i> , 1984; Ramesh <i>et al.</i> , 1998) et (Ramesh and Pascal, 1997)). Leur distribution altitudinale et latitudinale est illustrée sur la figure I.6.	19
Tableau II.1 : Répartition des 180 spectres polliniques actuels dans les domaines bioclimatiques des Ghâts occidentaux a) MTCO >15°C, b) MTCO <15°C, définis par les botanistes (Pascal, 1982).	27
Tableau III.1 : Répartition des 184 taxons polliniques du dataset des Ghâts occidentaux en fonction de la phénologie des plantes qu'ils représentent.	138
Tableau IV.1 : Coefficients de régression standardisés et moyennés sur 50 calibrations ($\frac{\sigma}{S\sigma}$, moyenne; $S\sigma$ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable température.	153

Tableau IV.2 : Coefficients de régression standardisés (\bar{r}) et moyennés sur 50 calibrations ($S_{\bar{r}}$ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable pluviométrie annuelle.	158
Tableau IV.3 : Coefficients de régression standardisés (\bar{r}) et moyennés sur 50 calibrations ($S_{\bar{r}}$ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable coefficient d'humidité (E/PE, %).	162
Tableau IV.4 : Localisation des carottes marines SK128A-30 et -31 en Mer d'Arabie et détails concernant les analyses polliniques effectués et les datations.	166
Tableau IV.5 : Regroupement des taxons polliniques fossiles des carottes marines SK128A-30 et -31, d'après les analyses statistiques de la pluie pollinique actuelle des différents types de végétations de l'Inde du Sud, discutées au Chapitre III.....	169

Liste des Annexes

Annexe I.1 : Carte simplifiée de la végétation de la région de Belgaum -Dharwar -Panaji entre 16° et 14°30'N, d'après Pascal <i>et al.</i> (1984).....	
Annexe I.2 : Carte simplifiée de la végétation de la région de Shimoga entre 14°30'N et 13°N, d'après Pascal <i>et al.</i> (1982a)	
Annexe I.3 : Carte simplifiée de la végétation de la région de Mercara -Mysore entre 13°N et 11°30'N, d'après Pascal <i>et al.</i> (1982b).....	
Annexe I.4 : Carte simplifiée de la végétation de la région de Thiruvananthapuram -Tirunelveli entre 10° et 8°N, d'après Ramesh <i>et al.</i> , 1998	
Annexe II.1 : Liste des 206 échantillons polliniques de surface collectés entre 8°-16°N et 74° et 78°E, Ghâts occidentaux, Inde du Sud.	
Annexe II.2 : Diversité taxonomique des spectres polliniques de plusieurs types de végétation, appréciée par la courbe représentant le nombre de taxons identifiés (AP, NAP et NC) en fonction du nombre de grains comptés lors de l'analyse au microscope optique.	
Annexe II.3: Liste des taxons polliniques identifiés pour les Ghâts occidentaux.	
Annexe II.4 :Liste des 49 stations météorologiques dont les données de pluviométrie ont été rassemblées par L'Institut Français de Pondichéry (Inde) et pour lesquelles il y a plus de 29 ans d'enregistrements. * indique les périodes de temps pour lesquelles il manque parfois une ou plusieurs années d'enregistrement.	
Annexe II.5 : Liste des stations situées entre 8° et 16°N et entre 74° et 78°E, du fichier Leemans & Cramer (1991), ayant fourni les moyennes mensuelles homogénéisées de température, précipitation et d'ensoleillement.	
Annexe II.6 : Valeurs interpolées aux sites polliniques actuels de température moyenne annuelle (TANN, °C), température moyenne du mois le plus froid (MTCO, °C), précipitations annuelles (PANN, mm/an) et coefficient d'humidité (E/PE, %).	
Annexe III.1: Article à Journal of Biogeography (Bonnefille et al., 1999).	

A mes parents et à ma sœur

A mes frères de cœur

Sébastien,

Laurent, Etienne et

Mohan

INTRODUCTION

- **Problématique, objectifs et choix de la région étudiée**

Les changements climatiques induits par les variations cycliques de certains paramètres orbitaux terrestres ont eut des incidences notables sur la circulation océanique, sur les continents et les civilisations. Ils semblent notamment qu'ils aient eu un impact considérable sur le système de la mousson asiatique (Joussaume *et al.*, 1999). L'amplitude de ces changements et leur effet sur les écosystèmes varient d'une région du globe à l'autre. Une des clés pour appréhender la réponse des écosystèmes terrestres aux changements climatiques futurs, est de comprendre comment ces écosystèmes ont réagi aux changements climatiques dans le passé. Pour connaître la composition des écosystèmes terrestres du passé, on dispose d'outils tels que les pollens, composé d'un matériau complexe et résistant (la sporopolléine) qui assure leur préservation sur des milliers, voir des millions d'années. Les pollens sont produits par la végétation et sont dispersés par le vent et les cours d'eau. Retrouvés dans les sédiments tourbeux, lacustres ou marins, ils fournissent des indications sur la végétation passée. Partant du principe qu'un certain type de végétation se développe dans une région donnée sous des conditions climatiques bien définies (Neilson *et al.*, 1989; Prentice *et al.*, 1992; Woodward, 1987), il est possible de tirer une information climatique des spectres polliniques fossiles. Cependant, l'interprétation de ces spectres fossiles ne peut se faire que si l'on connaît le signal pollinique de la végétation actuelle.

L'étude de la pluie pollinique actuelle a pour but de comprendre le signal pollinique de la végétation, sachant que des biais importants sont induits par la production, la dispersion et la préservation des pollens qui varient d'une plante à l'autre et souvent en fonction de leurs stratégies d'expansion. En Asie, les Dipterocarpaceae, les Lauraceae et les Annonaceae par exemple sont des familles botaniques typiques des forêts tropicales car elles constituent parfois jusqu'à 80% des éléments de la végétation (e. g. (Ashton, 1964; Pascal, 1988; Whitmore, 1975). Cependant, dû en partie au mode pollinisation entomophile qu'elles utilisent et à la faible capacité de préservation de leurs grains de pollens, on ne retrouve qu'occasionnellement dans la pluie pollinique les pollens de ces plantes (Raj and Van der Werff, 1988; Rowley and Vasanthi, 1993; Van der Merwe *et al.*, 1990). Il est donc nécessaire de déterminer quels sont les autres éléments de la végétation qui permettront d'identifier ces forêts tropicales par les pollens.

Avoir des données sur la pluie pollinique actuelle des végétations tropicales permettra de valider les modèles de végétation, tels que les modèles de Biome (Haxeltine and Prentice, 1996; Neilson, 1995; Prentice *et al.*, 1992), qui sont testés sur les données polliniques fossiles pour

reconstruire les végétations du passé. Ces modèles de Biome permettent de traduire les simulations climatiques des modèles atmosphériques de circulation générale (AGCMs) en terme de cartographie globale d'une végétation naturelle potentielle (Claussen and Esch, 1994). Couplés aux modèles de circulation générale, ces modèles de végétation permettront, une fois ajustés aux observations, de faire des prédictions sur les changements de végétation que pourraient induire un réchauffement climatique globale et/ou une augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère.

Le but de cette thèse de doctorat sur la pluie pollinique des forêts du sud de l'Inde vise donc à l'intégration de données actuelles à la modélisation globale de la végétation dans la zone tropicale de la mousson asiatique, en liaison avec la modélisation de circulation générale. Cette étude se situe pleinement dans le cadre d'un effort global de constitution de bases de données actuelles et fossiles. Elle s'insère dans un groupe international (BIOME 6000) dont l'objectif est une cartographie de la végétation à l'échelle du globe, à 6000 ans BP (période d'optimum de mousson), et intégrable dans les modèles numériques de circulation générale de type AGCM.

Les objectifs de ce travail de recherche sont donc de :

1) Contribuer à une meilleure connaissance du signal pollinique de la végétation actuelle de l'Inde péninsulaire, en identifiant les taxons polliniques marqueurs des forêts tropicales ; les éléments botaniques caractéristiques des forêts sempervirentes n'étant pas représentés dans la pluie pollinique ;

2) Fournir des données quantitatives sur la relation pluie pollinique actuelle / climat actuel et déterminer les taxons polliniques qui présentent une sensibilité particulière à la température, les précipitations et la saisonnalité des précipitations, en vue de reconstructions quantitatives des changements de mousson survenus dans le passé ;

3) Collaborer à la mise en évidence des seuils bioclimatiques déterminant les domaines d'existence des types de végétations (biomes), et ce dans le but de contribuer au développement d'un modèle de Biome, approprié aux végétations tropicales de l'Inde.

4) Contribuer au débat sur les changements climatiques survenus dans le passé, en appliquant à des spectres polliniques fossiles, des fonctions de transfert Pollen – Climat calibrées sur un large dataset actuel.

Le sujet de recherche de cette thèse de doctorat focalise sur la caractérisation quantitative de la réponse pollinique des végétations actuelles du sud de l'Inde, le signal pollinique étant considéré comme un proxy du signal de la végétation et du climat.

Le contexte des études palynologiques en Inde a été présenté et largement discuté dans les articles publiés et soumis (Barboni and Bonnefille, submitted; Barboni *et al.*, submitted; Bonnefille *et al.*, 1999).

La région choisie est celle des Ghâts Occidentaux, dans l'Inde péninsulaire. Le choix a été fait en fonction des critères suivants :

1) Les Ghâts occidentaux, de part leur localisation géographique sont directement soumis au climat saisonnier de la mousson asiatique. S'étalant entre 8° et 22°N le long de la côte ouest, ils permettent un échantillonnage de la végétation le long d'un gradient Sud – Nord de longueur de la saison sèche croissante et le long d'un gradient Ouest – Est de pluviométrie décroissante. De plus ils sont couverts d'une végétation abondante, et relativement bien protégée de la pression anthropique, ce qui est rare dans les tropiques. Une végétation à l'état le plus naturel possible est une condition essentielle à l'élaboration d'une base de données pollinique actuelle en vue de reconstructions paléoclimatiques.

2) La région des Ghâts occidentaux a été largement étudiée d'un point de vue floristique et biogéographique. On dispose à la fois de cartes de végétation à l'échelle 1 :250000^{ème} pour l'ensemble des Ghâts entre 8° et 16°N, de relevés floristiques détaillés et d'études approfondies sur la structure, la composition et la richesse des forêts, pouvant permettre un échantillonnage précis des types de végétation et une comparaison pluie pollinique – végétation approfondie.

3) La région des Ghâts occidentaux a été aussi largement étudiée d'un point de vue climatique. On dispose de deux cartes bioclimatiques à l'échelle 1 :500000^{ème} pour l'ensemble des Ghâts entre 8° et 16°N, représentant la distribution spatiale de trois paramètres climatiques, à savoir la température moyenne du mois le plus froid, la pluviosité moyenne annuelle et la longueur de la saison sèche moyenne annuelle, ainsi que les régimes pluviométriques et thermiques. Ces cartes bioclimatiques permettant d'élaborer une stratégie d'échantillonnage de la végétation en fonction du climat.

4) Pionnier dans l'étude des pollens depuis plus d'un demi-siècle, l'Institut Français de Pondichéry est riche d'environ 20000 lames de pollen de référence, pouvant permettre une bonne étude de la pluie pollinique dans tous les types de forêts rencontrés à forte diversité floristique.

- **Les stratégies adoptées**

Afin de remplir les objectifs fixés pour ce travail de thèse nous avons défini plusieurs stratégies. Une première stratégie a été mise au point lors de l'échantillonnage, en fonction des types de végétation représentés. Cette stratégie d'échantillonnage visait à obtenir un nombre conséquent et homogène de spectres polliniques par types de végétation, en évitant la perturbation anthropique.

Cette stratégie d'échantillonnage a aussi été établie en fonction de la distribution spatiale des composantes principales du climat, dans le but de constituer un dataset pollinique actuel représentatif d'un vaste intervalle de température, de pluviométrie et de saisonnalité des précipitations.

Lors de l'analyse de la relation Pollen – Climat, des recombinaisons d'échantillons correspondant à des conditions fixées pour un paramètre, permettent d'appréhender le signal pollinique sans l'effet des autres qui varient. Cette stratégie d'analyse a permis de discriminer le signal pollinique d'un seul paramètre et non d'une combinaison de différents signaux.

- **Le plan du mémoire**

Le mémoire comprend quatre chapitres. Après cette première introduction, le plan suivant est adopté. Le chapitre I donne les informations nécessaires à une bonne connaissance du milieu étudié à savoir, le cadre géographique général et végétal de la région des Ghâts occidentaux, les principaux mécanismes du climat de la mousson asiatique et de ses caractéristiques en Inde du sud.

Le chapitre II est un chapitre de matériel et méthodes. Une première partie traite des données polliniques et des méthodes statistiques employées à l'étude du signal pollinique de la végétation tropicale et du climat de mousson. Une deuxième partie présente les données météorologiques et la méthode d'interpolation spatiale qui a été utilisée pour le calcul des paramètres climatiques au niveau de chaque site pollinique actuel dans la région des Ghâts occidentaux.

Le chapitre III rassemble l'ensemble des résultats obtenus sur la relation pollen – climat et pollen – végétation. Trois articles (rédigés en anglais), publiés ou soumis à des revues à comité de lecture international, qui traitent chacun de phénomènes particuliers, mettent l'accent sur les caractéristiques de la pluie pollinique actuelle des forêts tropicales, en réponse aux trois gradients climatiques majeurs (Température, pluviométrie et saison sèche) de la mousson

indienne. Une partie de ce chapitre est consacrée aux résultats d'ensemble obtenus sur la relation pollen – végétation sur la totalité des échantillons. La synthèse donne les informations – clés pour la modélisation future des végétations de l'Inde tropicale.

Le chapitre IV présente l'utilisation de ces indices –clés à l'interprétation de l'information climatique contenue dans des spectres fossiles. Des reconstructions climatiques à partir de fonctions de transfert pollen – climat sont présentées pour deux séries fossiles provenant de carottes marines prélevées en mer d'Arabie, au large de la côte ouest du sud de l'Inde. Ces reconstructions climatiques renseignent une période de temps comprenant un cycle glaciaire – interglaciaire. Dans le but de montrer l'applicabilité de ce travail à d'autres régions soumises au climat de mousson asiatique sont aussi présentés, mais à titre de test, les reconstructions obtenues pour deux niveaux fossiles glaciaires d'une carotte marine au large de la Papouasie - Nouvelle Guinée.

Les conclusions générales soulignent les perspectives de ce travail dans le domaine de la quantification des changements climatiques et des modèles de végétation.

CHAPITRE I. Présentation du milieu

1. Cadre géographique

L'Inde est composée de trois grandes unités structurales à savoir l'arc himalayen et les régions adjacentes au nord, les plaines alluviales de l'Indus et du Gange au centre, et l'Inde péninsulaire au Sud, dont le plateau du Deccan constitue la majeure partie.

Les Ghâts occidentaux forment un escarpement qui s'étale de 8°10'N à 22°N, parallèlement à la côte occidentale de la péninsule indienne. Ils isolent une étroite frange côtière dont la largeur varie entre 30 et 60 km. Les Ghâts occidentaux forment un relief pratiquement continu sur 1600 km, dont l'altitude maximale varie du nord au Sud (Figure I.1). Trois grandes régions peuvent être distinguées. De Surat (22°N) à Goa (16°N), les Ghâts qui correspondent au rebord occidental du vaste plateau constitué par les épanchements basaltiques des Traps du Deccan, présentent une structure en marche d'escaliers (« *ghat* » en hindi) dont l'altitude varie entre 700 et 900 m environ. De Goa aux montagnes des Nilgiri (11°30'N) les Ghâts perdent leur aspect en gradins pour former une muraille abrupte dont l'altitude devient plus irrégulière. Elle se maintient entre 700 et 1000 m jusqu'à 14°N, s'élève brusquement à Kodachadri (1343 m) pour redescendre vers 600 m à Agumbe. A partir de Kudremukh (1892 m) jusqu'à la Trouée de Palghat, le rebord du plateau reste le plus souvent supérieur à 1000 m, les pics deviennent plus nombreux et plus élevés : Pushpagiri (1713 m) au nord du Coorg, Tadiannamal Betta (1745 m), Banasuram (2060 m), Vavul Mala (2339 m). Vers 11°30'N, les Ghâts s'élèvent brusquement par le horst des Nilgiri où ils font leur jonction avec les Ghâts orientaux. Ces montagnes des Nilgiri constituent un plateau surélevé culminant à 2637 m au Dotta Betta, qui domine au nord la trouée de Palghat d'un abrupt de plus de 2000 m. Après l'interruption de la trouée de Plaghat (10°30'N), les Ghâts réapparaissent brusquement avec le bloc Palnis-Anamalai dont les pics surélevés du bloc atteignent 2695 m au Ainaimudi.

Sur le plan géologique, les Ghâts occidentaux sont constitués par deux catégories de matériaux : les basaltes effusifs des Traps du Deccan entre 16° et 21°N, et le socle précambrien entre 8° et 16°N. Les formations sédimentaires récentes sont très rares et limitées à la zone côtière du Kérala.

Les sols des zones humides sont des sols ferrallitiques indurés pour la plupart. Les « sols rouges » des zones semi-arides sont de type fersiallitique. Les sols d'altitude sont très organiques (Bourgeon, 1988; Caner, 2000).

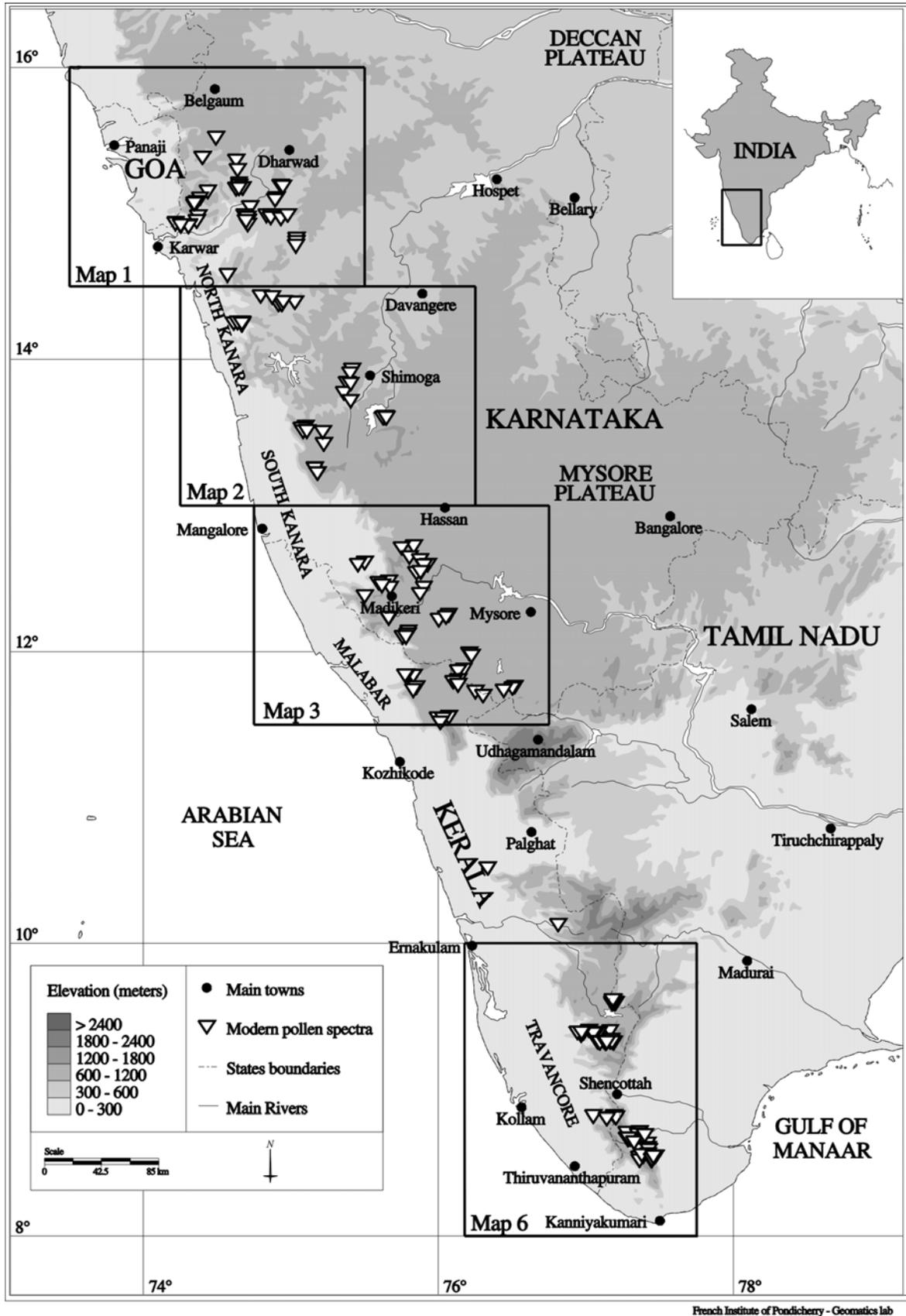


Figure I.1 : Hypsométrie des Ghâts occidentaux, Inde du Sud et localisation des sites polliniques actuels.

2. Climat de mousson

Les Ghâts occidentaux sont sous influence directe du climat de mousson. La mise en évidence du signal climatique dans la pluie pollinique des végétations actuelles sous climat de mousson, nécessite une bonne connaissance du phénomène, ainsi que de sa variabilité spatiale et temporelle. Dans cette partie seront donc décrits 1) les caractéristiques de la mousson, 2) les mécanismes physiques responsables de ce phénomène climatique, 3) et la variabilité inter-annuelle et inter-décennale de la mousson actuelle.

2.1. Définition et caractéristiques

Le terme mousson est appliqué pour définir le système saisonnier des vents qui soufflent le long des côtes de l'Océan indien et de la Mer d'Arabie, vers le Sud-Ouest durant une partie de l'année et vers le nord-Est durant l'autre partie de l'année (Ramage, 1971). Au sens large, la mousson définit l'ensemble des phénomènes associés au cycle climatique annuel des régions tropicales et subtropicales des continents asiatique, australien et africain, et des mers et océans voisins (Webster, 1987).

La caractéristique principale de la mousson est une saisonnalité très marquée, avec une phase « humide » et une phase « sèche ». La phase humide correspond à la saison des pluies, durant laquelle les vents chauds et humides soufflent de l'océan vers les terres. La phase sèche correspond à l'autre moitié de l'année, lorsque la direction des vents s'inverse, transportant de l'air froid et sec des continents vers l'océan. En bref, un climat de mousson se caractérise par la variation annuelle de deux phénomènes : les vents (de direction opposée selon la saison) et les pluies (une saison des pluies en été, une saison sèche en hiver). Ce climat touche près de la moitié des tropiques et un quart de la surface du globe. Sur la figure 2 sont représentées les régions du globe rassemblant les deux caractéristiques de la mousson ainsi que les zones où les précipitations sont importantes et les principaux systèmes de vent de surface.

L'Inde est l'exemple classique du cycle annuel de mousson. Pendant l'été les vents de surface sont de direction Sud-Ouest (ISWM pour Indian Southwest Monsoon) (Figure I.2). A l'approche de l'hiver ils s'inversent et le climat devient froid et sec (NEWN pour Northeast Winter Monsoon). Sur la figure I.2 sont aussi représentées les régions où les températures sont maximales. Les zones les plus chaudes (Sahara et Sahel en Afrique, Pakistan et Rajasthan au Moyen Orient et l'Australie Centrale) sont localisées de part et d'autre de l'équateur aux limites Sud et nord de la zone de mousson. Les régions les plus froides sont dans l'hémisphère nord, d'où proviennent les vents de basse pression du système de mousson. Les masses continentales de l'hémisphère Sud, plus petites et plus proches de l'équateur que celles de l'hémisphère nord, possèdent des climats d'hiver plus chauds. Ainsi, le courant d'hiver partant des continents de l'hémisphère Sud, ne sont pas aussi froids que ceux provenant des grandes masses continentales de l'hémisphère nord (Webster, 1987).

Figure I.2 : Domaines des principaux systèmes atmosphériques de la mousson durant l'hiver austral (a) et l'hiver boréal (b) (tiré de Webster, 1987).

La distribution des masses continentales et océaniques, le réchauffement différentiel existant entre ces masses, la rotation de la terre subie par les vents, ainsi que l'ensemble des processus de transfert d'énergie solaire constituent les mécanismes physiques élémentaires de la mousson. Ils sont résumés ci-après.

2.2. Mécanismes physiques

- **Le réchauffement différentiel**

Terres et océans n'ayant pas les mêmes propriétés physiques (l'un est solide, l'autre liquide), ils ne se réchauffent pas à la même vitesse, ni de la même façon. Ainsi, bien que les océans nécessitent plus d'énergie que les continents pour être chauffés (dû à la faible chaleur spécifique de l'eau), ils peuvent aussi emmagasiner plus d'énergie, de part leur nature fluide qui permet un transfert efficace de la chaleur reçue en surface vers les profondeurs. Le réchauffement différentiel entre continents et océans résulte en un fort gradient de pression qui crée une circulation continue des masses d'air. Le réchauffement différentiel entre océans et continents est accru par la distribution différentielle de l'énergie solaire incidente entre les deux hémisphères. Ainsi, en hiver boréal/austral (décembre, janvier, février / juin, juillet, août),

l'hémisphère nord/Sud perd plus de chaleur qu'elle n'en gagne. En été boréal/austral, l'hémisphère nord/Sud accumule plus de chaleur qu'elle n'en perd. Le fort réchauffement radiatif différentiel saisonnier entre les deux hémisphères induit un transport de chaleur des régions « surchauffées » (les tropiques et l'hémisphère d'été) vers les zones où il y a un déficit de chaleur (l'hémisphère d'hiver) (Webster, 1987). La migration annuelle des puits thermiques et des principales sources de chaleur pour l'atmosphère dans les tropiques et zones subtropicales conditionne le système de mousson (Webster *et al.*, 1998).

- **Les processus humides**

Un autre mécanisme physique important de la mousson concerne les phénomènes liés à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Bien que la circulation de mousson soit déterminée par les différences de température entre océans et continents, elle est aussi influencée par les énormes quantités d'énergie solaire (chaleur) piégées dans les océans tropicaux. La majeure partie de l'énergie solaire incidente sur les océans et les régions continentales humides sert à évaporer l'eau. Cette énergie solaire piégée dans les molécules de vapeur d'eau, est relâchée sous forme de précipitations lorsque l'air chargé d'humidité est contraint de s'élever à l'encontre des continents chauffés. L'ascension d'air chargé d'humidité entraîne la condensation de la vapeur d'eau et la chaleur accumulée est ainsi libérée par les précipitations. Aussi, plus l'air est chaud, plus sa capacité à contenir de la vapeur d'eau est grande. Par conséquent, plus les colonnes d'air sont chaudes, plus elles ont le potentiel de libérer de la chaleur latente et donc des précipitations. Les processus humides ont donc un impact important sur la vigueur de la mousson en accroissant le gradient de pression entre les masses d'air de la haute troposphère. En fait, le réchauffement latent de l'air chaud et humide au-dessus des continents est si intense, que la température de la haute troposphère au-dessus de la région de mousson est largement plus élevée qu'au-dessus de l'équateur. Une autre conséquence de cet intense réchauffement latent est que l'air qui s'élève dans l'hémisphère d'été subtropical est caractérisé par de profonds nuages de convection et d'intenses précipitations.

- **L'impact de la rotation de la terre**

La force de Coriolis, causée par rotation de la terre, fait dévier les vents de mousson vers la gauche dans l'hémisphère Sud et vers la droite dans l'hémisphère nord. Son ampleur croît de façon constante de l'équateur où elle est nulle, aux pôles où elle est alors maximale.

Le réchauffement différentiel, les processus humides et la force de Coriolis sont les trois mécanismes physiques majeurs expliquant dans les grandes lignes la structure et la circulation de la mousson actuelle.

2.3. Variabilité

La variabilité annuelle de la mousson, où saison sèche alterne avec saison humide, est contrôlée par le cycle saisonnier de la course du soleil qui détermine la distribution latitudinale de l'énergie solaire incidente (Webster, 1987) (Figure I.3).

Figure I.3 : Coupes représentant la circulation atmosphérique le long du méridien 90°E durant l'été boréal en Asie du Sud. La position du point d'insolation maximale est marquée par une flèche (Smax). Les barres représentent les zones de précipitations maximales (d'après (Webster, 1987).

En Inde, l'analyse d'enregistrements pluviométriques depuis 1840 (Walker, 1910) montrent que les périodes 1880-1895 et 1930-1963 sont caractérisées par des précipitations supérieures à la normale avec très peu de sécheresses, tandis que les périodes 1895-1930 et 1963-1990 sont caractérisées par des précipitations inférieures à la normale présentant une grande fréquence de sécheresses (Bhalme and Mooley, 1980; Kulkarni and Kripalani, 1998). La distribution spatiale des pluies montre que lors des périodes de précipitations inférieures à la normale, toutes les régions de l'Inde présentent des écarts à la moyenne négatifs, excepté l'extrême Nord-Est. En ce qui concerne la côte Ouest de la péninsule, les déficits s'accroissent du Sud au nord et sont supérieurs à 10% au-delà de 15°N et supérieurs à 30% dans la région du Rajasthan (Figure I.4). Lors des périodes de précipitations excessives, c'est également au Rajasthan que les écarts sont les plus importants (+30%). Ils sont inférieurs à 10% au Sud de 13°30'N et nuls dans la région Nord-Est (Kulkarni and Kripalani, 1998). La variabilité temporelle inter-décennale de l'intensité des pluies de mousson présenterait une cyclicité d'environ 30 ans (Kraus, 1977).

a) Mousson déficitaire

b) Mousson excédentaire

Figure I.4 : Distribution spatiale des anomalies de pluviométrie en pourcentage d'écart par rapport à la moyenne, pendant les périodes de mousson déficitaires (a) et excédentaires (b) en Inde (d'après (Kulkarni and Kripalani, 1998).

2.4. Mousson en Inde du Sud

Le front de mousson arrive à la pointe Sud de la péninsule indienne fin mai. Il est à Trivandrum (8°10'N) le 1 juin, à Goa (16°N) le 5 juin et atteint Bombay (18°N) aux alentours du 10 juin (Ananthkrishnan and Soman, 1988; Bansod *et al.*, 1991). Alors que la progression

Sud -nord de la mousson se fait en l'espace de 10-15 jours, le retrait s'étale sur plus de 2.5 mois. Il commence fin septembre dans le nord de l'Inde et se termine au Cap Comorin (8°N) vers le 1^{er} décembre (Singh, 1986). L'avancée et surtout le retrait progressif de la mousson déterminent la longueur de la saison sèche, qui est un des paramètres clé de la distribution de la végétation en Inde péninsulaire (Pascal, 1988).

Bien que les vents de mousson traversent toute la péninsule indienne, les pluies d'été sont cependant limitées à la région des Ghâts occidentaux. Les Ghâts, qui longent la côte Ouest jouent un double rôle : 1) ils permettent le déclenchement de fortes précipitations en créant un excès de turbulence atmosphérique par effet orographique (Ramachandran and Banerjee, 1983) ; et 2) ils bloquent la pénétration à l'intérieur des terres des pluies de mousson au-delà de 90 km de la côte, créant ainsi entre 10° et 22°N, une zone semi -aride où l'effet de la mousson est très atténué (Gadgil and Joshi, 1983; Gunnel, 1997; Singh, 1986). La pénétration limitée des pluies selon un axe Ouest -Est conditionne l'existence des forêts sempervirentes, qui sont strictement localisées dans la zone pluvieuse (Pascal, 1988).

2.5. Bioclimats

La relation climat – végétation est appréhendée sous le concept du bioclimat. Un bioclimat est un système défini par l'inter-relation entre les différents facteurs environnementaux et climatiques qui sont responsables de la distribution des types de végétation et des espèces. En Inde, la relation entre la végétation et les facteurs climatiques a été étudiée très tôt par les forestiers et les botanistes qui ont cherché à déterminer les zones géographiques caractérisées par des systèmes climatiques semblables dans le but d'introduire des espèces exotiques ou d'étendre des plantations de bois à fort intérêt économique (Champion and Seth, 1968; Seth and Waheed Khan, 1959).

Plusieurs cartes bioclimatiques ont été réalisées. Une première série, produites à petite échelle couvre la totalité du continent indien (Labroue *et al.*, 1965; Legris and Viart, 1961). Deux cartes à grande échelle (1:100.000^{ème}) couvrent les montagnes des Palnis et Nilgiris uniquement (Blasco, 1971). Deux cartes au 1:500.000^{ème} couvrent les Ghâts Occidentaux de 8° à 16°N (Pascal, 1982). Ces cartes renseignent la totalité de notre zone d'étude (Figure I.5). Elles ont été élaborées à partir de nombreux relevés météorologiques et d'images satellites donnant avec précision les limites de végétation. Ces cartes représentent la distribution spatiale de trois paramètres climatiques, à savoir la température moyenne du mois le plus froid, la pluviosité moyenne annuelle et la longueur de la saison sèche moyenne annuelle, ainsi que les régimes pluviométriques et thermiques (Pascal, 1982).

Figure I.5 : Bioclimats des Ghâts occidentaux (Pascal, 1982).

L'existence des différents types de végétation rencontrés dans la région des Ghâts occidentaux et du Plateau de Mysore est déterminée par 3 gradients climatiques majeurs (Pascal, 1982). Le premier gradient climatique est un gradient thermique lié à l'altitude. La température diminue d'Ouest en Est en fonction d'une altitude croissante. La température du mois le plus froid est supérieure à 23°C en dessous de 650 m d'altitude et inférieure à 15°C au-dessus de 1500 m (Figure I.5c).

Le deuxième gradient est un gradient Ouest –Est de pluviométrie décroissante, lié à la pénétration limitée des pluies de mousson à l'intérieur des terres. Les montants annuels de pluie sont de 2000 à plus de 5000 mm/an dans la zone côtière et les Ghâts occidentaux. Ils sont modérés (1200-2000 mm/an) et faibles (<1200 mm/an) dans la zone semi-aride sur le Plateau de Mysore (Figure I.5b).

Le troisième gradient climatique est un gradient de longueur de saison sèche. Pour la zone pluvieuse, i.e. la zone côtière et les versants Ouest des Ghâts, la saison sèche augmente du Sud au Nord en fonction de l'avancée et du retrait du front de mousson. Elle est inférieure à 2 mois entre 8° et 10°N et supérieure à 6 mois au nord de 14°N (Figure I.5a). Notons que dans la figure I.5a, la longueur de la saison sèche est estimée en fonction de l'Index de Gaussen, selon lequel un mois est considéré comme sec lorsque la quantité de pluie tombée est inférieure à deux fois la température moyenne mensuelle (Bagnouls and Gaussen, 1953).

3. Végétation

La grande variété des climats dans la région des Ghâts occidentaux conditionne la distribution caractéristique des types de végétations. La répartition géographique des types de végétation est donnée de façon précise par des cartes à l'échelle 1:250.000 produites par l'Institut Français de Pondichéry (Pascal *et al.*, 1982a; Pascal *et al.*, 1982b; Pascal *et al.*, 1984; Ramesh *et al.*, 1998). Ces cartes de végétation ont été simplifiées et reproduites en annexes (Annexes I.1 à I.4). Dans les paragraphes suivants, nous donnerons pour chacun des types de végétation rencontrés sa distribution dans l'espace géographique et climatique ainsi que ses caractéristiques physiologiques et floristiques. Les types de végétation de haute altitude n'entrant pas dans le cadre de la thèse ne sont que brièvement décrits.

3.1. Forêts sempervirentes

- **Distribution géographique et climatique**

Les forêts sempervirentes *sensu largo* sont localisées entre 8° et 16°N, essentiellement sur les versants Ouest des Ghâts occidentaux où elles reçoivent directement les pluies d'été de la mousson Sud-Ouest. On trouve aussi des forêts sempervirentes sur les versants Est des Ghâts dans la région de Tirunelveli, à l'extrême Sud de la péninsule indienne (Ramesh *et al.*, 1998). La distribution géographique des forêts sempervirentes montre que leur domaine climatique est surtout défini par une pluviométrie annuelle >2000 mm/an, et une longueur de la saison sèche < 8 mois/an. Etant présentes entre 0 et 2200 m d'altitude, elles supportent des températures moyennes annuelles comprises entre 28°C et 14°C (Pascal, 1982; Pascal, 1988).

La pluviométrie annuelle étant toujours supérieure à 2000 mm/an, la composition floristique des forêts sempervirentes varie du Sud au nord des Ghâts en fonction d'une longueur de saison sèche croissante et en fonction de l'altitude (Pascal, 1988). En fonction de la longueur de saison sèche les forêts sempervirentes *sensu largo* ont été distinguées en 3 catégories :

1. les forêts sempervirentes humides (saison sèche de 0 à 4 mois),
2. les forêts sempervirentes (saison sèche de 4 à 5 mois)
3. et les forêts semi-sempervirentes (saison sèche de 5 à 7 mois).

En fonction de l'altitude, les forêts ont été distinguées en 4 catégories :

1. forêts de basse altitude (0-800 m),
2. forêts de moyenne altitude (800-1400 m),
3. forêts de transition (1400-1800 m)
4. et forêts de haute altitude ou sholas (1800-2500 m).

- **Physionomie**

Bien que les compositions floristiques évoluent et changent en fonction de la longueur de la saison sèche et de l'altitude, la structure spatiale (physionomie) des forêts montre peu de variations. On remarquera cependant la différence de structure entre 1) les forêts sempervirentes de basse/moyenne altitude (0-1800 m) et celles de haute altitude (>1800 m) ; 2) les forêts sempervirentes/sempervirentes humides et les forêts semi-sempervirentes.

Entre 0 et 1800 m, les forêts sempervirentes sont constituées de grands arbres dont la hauteur moyenne est de 25-30 m (Ghate *et al.*, 1998). La hauteur atteint parfois 50 à 60 m dans les forêts à Dipterocarpaceae (Pascal, 1988). La canopée est dense et pratiquement fermée avec un

pourcentage de recouvrement supérieur à 95%. Presque tous les arbres (90%) appartiennent à des espèces sempervirentes. Les feuilles sont épaisses, de taille moyenne (mésophylles), de couleur vert sombre et brillantes. L'écorce de la plupart des arbres est lisse. Les lianes sont abondantes parfois et la strate inférieure est pratiquement dépourvue de plantes herbacées. A part les bambous et *Pandanus*, les autres espèces épineuses sont rares (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986).

Au-dessus de 1800 m d'altitude, les forêts sempervirentes des Ghâts occidentaux aussi appelées *sholas*, sont constituées d'arbres rabougris, tordus, dont la hauteur moyenne est de 10-20 m. Les arbres sont couverts de lichens et d'épiphytes. Les feuilles sont de petites tailles (meso- et microphylles). La canopée est dense (Pascal, 1986).

Les forêts semi-sempervirentes, surtout rencontrées au nord de 13°30'N, sont constituées par un mélange d'arbres sempervirents et décidus de taille moyenne (15-20 m), qui forment une forêt fermée (avec un pourcentage de recouvrement de 60-80%). Environ 40 à 80% des arbres sont sempervirents. Contrairement aux forêts sempervirentes décrites précédemment, les arbres des forêts semi-sempervirentes sont plutôt rabougris et forment une canopée irrégulière. Les plantes herbacées sont parfois abondantes, tout comme les lianes. Bambous et *Pandanus* sont rares (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986).

- **Composition floristique**

Les forêts sempervirentes *sensu largo* de basse et moyenne altitude (0-1400) sont surtout caractérisées par l'abondance des Dipterocarpaceae (entre 8° et 13°N) et des Ebenaceae (entre 13° et 16°N), tandis que les forêts de haute altitude (1400-1800 m) sont surtout caractérisées par l'abondance des Lauraceae et la présence des Ericaceae. A basse et moyenne altitude, l'abondance des Dipterocarpaceae entre 8° et 13°N caractérise les forêts sempervirentes humides et sempervirentes, tandis que l'abondance des Ebenaceae entre 13° et 16°N caractérise les forêts semi-sempervirentes (Pascal, 1988).

En plus de ces distinctions, des types floristiques ont été identifiés d'après l'aire de distribution des espèces endémiques (Pascal, 1988; Ramesh and Pascal, 1997). Dans le tableau ci-après sont listés les différents types floristiques qui ont été identifiés (Tableau I.1).

Types floristiques	
1.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Kingidendron pinnatum</i> – <i>Strombosia ceylanica</i>
2.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Dipterocarpus bourdilloni</i> – <i>Strombosia ceylanica</i>
3.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Kingidendron pinnatum</i> – <i>Humboldtia brunonis</i>
4.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Humboldtia brunonis</i> – <i>Poeciloneuron indicum</i>
5.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Persea macrantha</i>
6.	<i>Dipterocarpus indicus</i> – <i>Diospyros candolleana</i> – <i>Diospyros oocarpa</i>
7.	<i>Persea macrantha</i> – <i>Diospyros</i> spp. – <i>Holigarna</i> spp.
8.	<i>Diospyros</i> spp. – <i>Dysoxylum malabaricum</i> – <i>Persea macrantha</i>
9.	<i>Cullenia exarillata</i> – <i>Mesua ferrea</i> – <i>Palaquium ellipticum</i> – <i>Gluta travancorica</i>
10.	<i>Cullenia exarillata</i> – <i>Mesua ferrea</i> – <i>Palaquium ellipticum</i>
11.	<i>Mesua ferrea</i> – <i>Palaquium ellipticum</i>
12.	<i>Poeciloneuron indicum</i> – <i>Palaquium ellipticum</i> – <i>Hopea ponga</i>
14.	<i>Gomphandra tetrandra</i> – <i>Litsea</i> spp. – <i>Bhesa indica</i>
15.	<i>Schefflera</i> spp. – <i>Meliosma arnottiana</i> – <i>Gordonia obtusa</i>
16.	<i>Litsea</i> spp. – <i>Syzygium</i> spp. – <i>Microtropis</i> spp.
17.	<i>Diospyros foliolosa</i> – <i>Mitrephora heyneana</i> – <i>Miliusa</i> spp. – <i>Kingidendron pinnatum</i>
18.	<i>Diospyros foliolosa</i> – <i>Mitrephora heyneana</i> – <i>Miliusa</i> spp.
19.	<i>Diospyros ovalifolia</i> – <i>Memecylon lushingtonii</i> – <i>Olea glandulifera</i>

Tableau I.1 : Les types floristiques des Ghâts occidentaux (d'après (Pascal *et al.*, 1982a; Pascal *et al.*, 1982b; Pascal *et al.*, 1984; Ramesh *et al.*, 1998) et (Ramesh and Pascal, 1997)). Leur distribution altitudinale et latitudinale est illustrée sur la figure I.6.

La répartition géographique des types floristiques sempervirents sur les versants Ouest et Est des Ghâts est schématisée dans la Figure I.6.

A basse altitude (0-800 m), les types 1 et 2 **sempervirents humides** et le type 3 **sempervirent** sont caractérisés par l'abondance des Dipterocarpaceae (*Dipterocarpus*, *Vateria*, *Hopea*), des Caesalpiniaceae (*Kingiodendron*, *Humboldtia*), Myristicaceae et des Euphorbiaceae (*Baccaurea*, *Blachia*, *Croton*, *Drypetes*, *Fahrenheitia*, *Mallotus*). Dans les faciès à *Poeciloneuron* du type 4, les Clusiaceae (auxquelles appartiennent cette espèce ainsi que *Garcinia*, *Mesua* et *Calophyllum*) prennent une importance égale ou supérieure à celle des Dipterocarpaceae. D'autres familles telles que les Anacardiaceae (*Gluta*, *Holigarna*), Myrtaceae (*Syzygium*, *Eugenia*) et les Meliaceae (*Aglaia*, *Dysoxylum*) sont aussi bien représentées dans la canopée. Dans le sous-bois, les familles les mieux représentées sont les Celastraceae (*Microtropis*, *Euonymus*), Rubiaceae (*Ixora*, *Psychotria*), Rutaceae (*Acronychia*, *Clausena*, *Euodia*, *Toddalia*, *Vepris*) et les Melastomataceae (*Memecylon*). D'autres familles telles que les Sapotaceae (*Palaquium*, *Mimusops*), Elaeocarpaceae (*Elaeocarpus*), Flacourtiaceae (*Hydnocarpus*, *Flacourtia*), Lauraceae (*Cryptocarya*, *Cinnamomum*, *Litsea*, *Persea*),

Sapindaceae (*Dimocarpus*, *Otonophelium*), Annonaceae (*Polyalthia*, *Meiogyne*) sont représentées par quelques espèces formant souvent de grands arbres ou des arbres de taille moyenne, fréquents dans la plupart des types sempervirents et sempervirents humides de basse altitude (Pascal, 1988). Dans les ouvertures naturelles des types sempervirents et sempervirents humides, à basse et moyenne altitude on rencontre *Tetrameles* (Tetramelaceae), *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae), *Aporosa*, *Macaranga* (Euphorbiaceae), *Leea* (Leeaceae), le palmier *Caryota urens* et quelques espèces décidues telles que *Terminalia* (Combretaceae), *Bombax* (Bombacaceae), *Lagerstroemia* (Lythraceae), *Schleichera* (Sapindaceae). Les lianes, bien qu'étant peu abondantes dans la forêt, appartiennent à de nombreuses espèces telles que *Gnetum*, *Piper*, *Toddalia*, *Elaeagnus*, *Entada* (Pascal, 1988).

A basse altitude, les forêts **semi-sempervirentes** des types 6 et 7, qui subissent une saison sèche supérieure à 5 mois sont caractérisées par l'abondance de *Diospyros* (Ebenaceae). Les Ebenaceae sont également abondantes dans les forêts sempervirentes humides du versant oriental des Ghâts (types 17 et 18, Figure I.6), également soumise à une saison sèche supérieure à 5 mois. Les Anacardiaceae (*Holigarna*) et les Euphorbiaceae (surtout représentées par les espèces héliophiles *Aporosa* et *Macaranga*) sont aussi bien représentées.

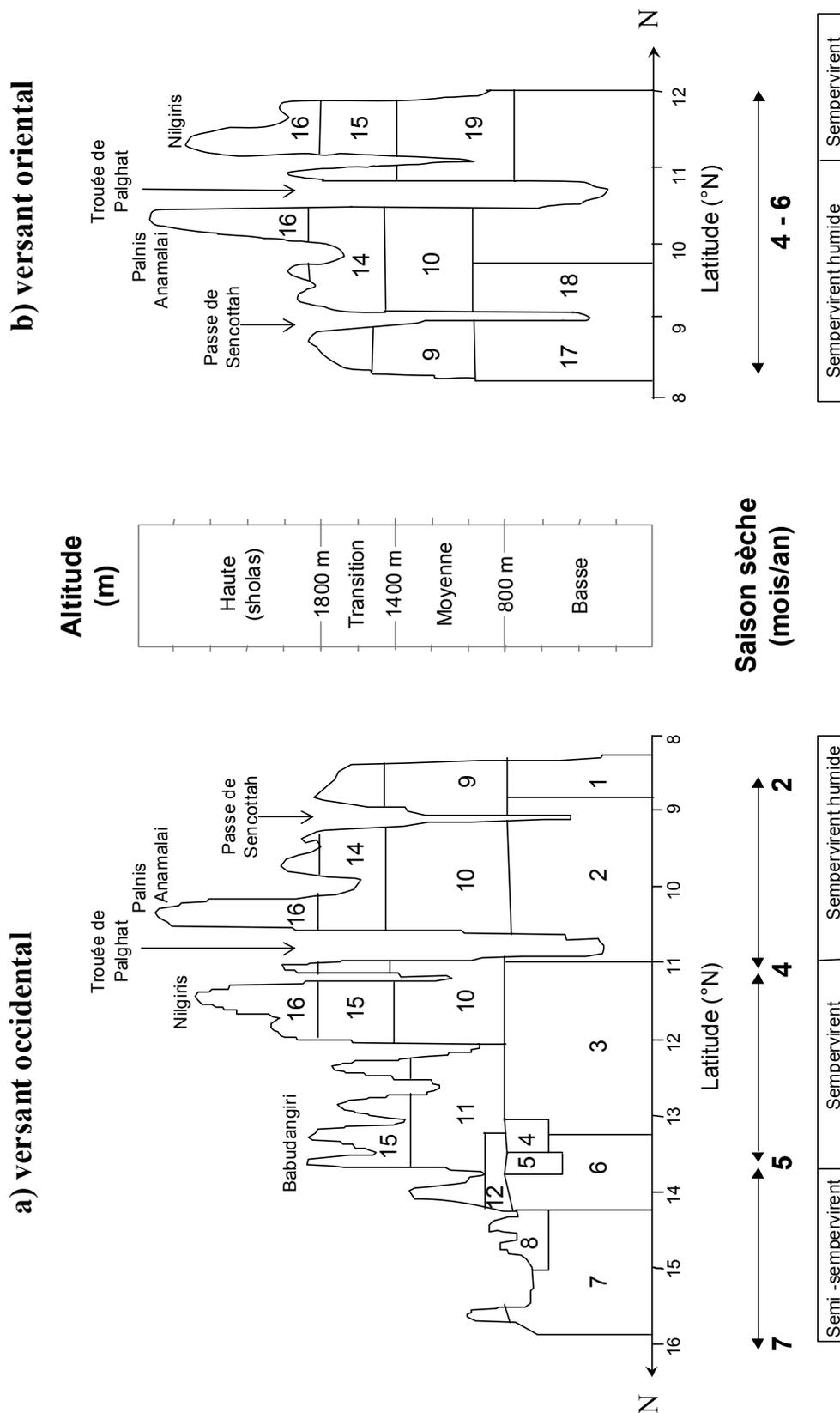


Figure I.6 : Profils topographiques de direction Sud –nord a) versant occidental, b) versant oriental, représentant la répartition des types floristiques sempervirents *sensu largo* en fonction de la latitude et de l’altitude (reproduit d’après (Ramesh and Pascal, 1997)).

A moyenne altitude (800-1400 m), la composition floristique des forêts **sempervirentes** et **sempervirentes humides** (types 9 et 10) change totalement. Les Dipterocarpaceae et Ebenaceae, abondantes à basse altitude, ne jouent plus qu'un rôle effacé au-dessus de 800 m d'altitude. Les forêts de moyenne altitude sont plutôt caractérisées par l'abondance des Bombacaceae (*Cullenia* uniquement), des Sapotaceae (*Palaquium* surtout), et des Clusiaceae (*Mesua*, *Calophyllum*), auxquelles s'ajoutent les Meliaceae (*Aglaia*) et les Euphorbiaceae (*Agrostistachys*, *Mallotus*, *Drypetes*). Il y a une limite botanique à 11°55'N, marquée par la disparition de *Cullenia* (type 11). D'autres familles telles que les Elaeocarpaceae, les Myristicaceae, les Myrtaceae, les Lauraceae, les Staphyleaceae, les Sapindaceae et les Anacardiaceae sont bien représentées dans tous les types à moyenne altitude.

Entre 1400 et 1800 m, les forêts de moyenne altitude sont remplacées par les forêts de transition (types 14 et 15), dans lesquelles les Lauraceae (*Listea*, *Cinnamomum*, *Alseodaphne*, *Neolitsea*, *Phoebe*), Myrtaceae (*Syzygium*, *Rhodomyrthus*), Araliaceae (*Schefflera*), Staphyleaceae (*Turpinia*), Myrsinaceae (*Ardisia*) et Symplocaceae (*Symplocos*) sont abondantes.

A haute altitude (>1800 m), la végétation est caractérisée par une mosaïque de forêts et savanes. Les savanes occupent les crêtes, tandis que les forêts aussi appelées *sholas*, occupent surtout les talwegs (Blasco, 1971). Les *sholas* (type 16) sont caractérisées par l'abondance des Myrtaceae (*Syzygium*), Lauraceae (*Listea*, *Cinnamomum*, *Persea*, *Neolitsea*), Symplocaceae (*Symplocos*), Araliaceae (*Schefflera*), Elaeocarpaceae (*Elaeocarpus*), Ericaceae (*Gaultheria*, *Rhododendron*), Oleaceae (*Chionanthus*, *Ligustrum*), Sabiaceae (*Meliosma*), Celastraceae (*Euonymus*, *Microtropis*) et des Aquifoliaceae (*Ilex*).

Les forêts « sempervirentes » dégradées par la pression anthropique, forte dans la zone côtière, contiennent en abondance des Melastomataceae, Myrtaceae (*Syzygium*, *Eugenia*) et de *Cassia*, *Careya*, *Emblica*, *Lagerstroemia*, *Terminalia*, *Schleichera* et *Xylia*. Cartographiées en tant que formations secondaires décidues humides, ces forêts sont constituées par de grands arbres décidus (10-20 m), formant une canopée fermée, mais peu dense. Les arbres sempervirents (0-40%), tels que *Olea dioica*, *Aporosa*, et *Flacourtia* sont bien représentés. Les lianes sont parfois très abondantes et le sous-bois est souvent envahi de *Lantana* et d'*Eupatorium*, associés à nombreuses espèces herbacées et épineuses (Pascal, 1988 ; Ghate *et al.*, 1998).

3.2. Forêts décidues

Les forêts décidues ont été classées en deux catégories : les forêts décidues humides et les forêts décidues sèches. Les forêts décidues humides présentent une composition floristique différente de celle des forêts décidues sèches, mais leur structure spatiale (physionomie) est identique (Pascal, 1982). La qualification « humide » « sèche » a été adoptée dans la mesure où les changements de composition floristique entre ces deux catégories semblent être liés à la pluviométrie, comme nous allons le décrire ci-dessous.

- **Distribution géographique et climatique**

Les forêts décidues humides et sèches sont localisées entre 8° et 16°N, sur les versants Est des Ghâts occidentaux où elles ne reçoivent qu'indirectement les pluies d'été de la mousson Sud-Ouest. Elles reçoivent également des brises de la mousson d'hiver (nord-Est). La distribution géographique des forêts décidues montre que leur domaine climatique est surtout défini par une pluviométrie annuelle <2000 mm/an (Figure I.7). Cependant, les forêts décidues humides sont plutôt localisées là où la pluviométrie est comprise entre 2000 et 1500 mm/an, tandis que les forêts décidues sèches sont localisées là où la pluviométrie est comprise entre 1500 et 600 mm/an. Forêts décidues sèches et humides subissent une saison sèche de 4 à 8 mois et des températures moyennes annuelles élevées supérieures à 23°C (Pascal, 1982; Pascal, 1988).

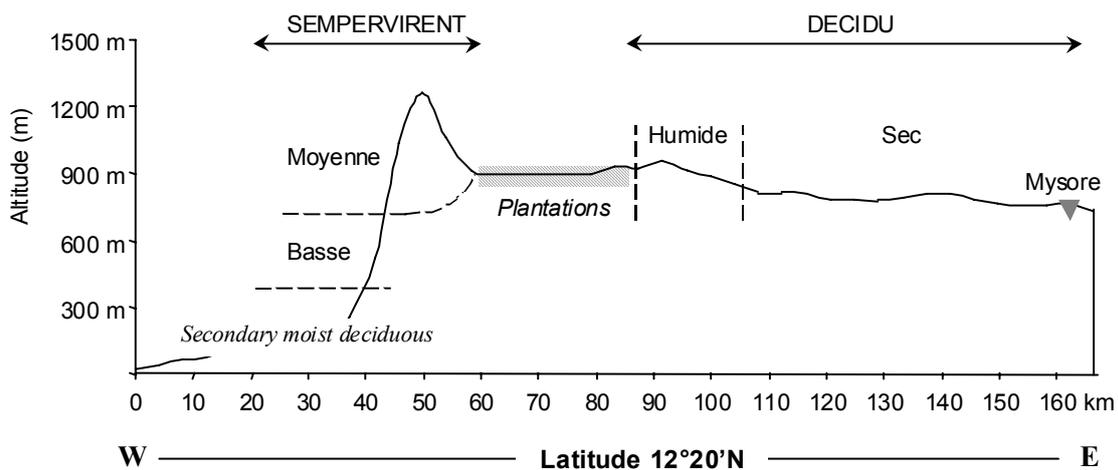


Figure I.7 : Profil topographique Ouest – Est dans les Ghâts occidentaux à la latitude 12°20'N, montrant la distribution spatiale des types sempervirents et décidus (d'après la carte de végétation Mercara-Mysore – Pascal et al., 1982b).

- **Physionomie**

La structure spatiale des forêts décidues humides et des forêts décidues sèches est identique : toutes deux sont caractérisées par la présence d'arbres de taille moyenne et par une strate herbacée (arbres et herbes). Les forêts décidues sèches ayant été moins protégées que les décidues humides, leur structure spatiale s'est vue modifiée par la forte pression anthropique : les forêts décidues sèches ressemblent plutôt à des savanes arborées.

- **Composition floristique**

Les forêts décidues humides sont caractérisées par l'abondance des arbres et arbustes tels que *Lagerstroemia* (Lythraceae), *Dillenia* (Dilleniaceae), *Terminalia* (Combretaceae), *Schleichera* (Sapindaceae), *Xylia*, *Acacia*, *Albizia* (Mimosaceae), *Careya* (Barringtoniaceae), *Tectona* (Verbenaceae). Elles sont aussi caractérisées la présence (et parfois l'abondance) remarquable de *Haldina*, *Mitragyna* (Rubiaceae), *Grewia* (Tiliaceae), *Ziziphus* (Rhamnaceae), *Bauhinia*, *Cassia* (Cæsalpiniaceae), *Dalbergia*, *Flemingia* (Fabaceae), *Glochidion*, *Emblia* (Euphorbiaceae), *Buchanania* et *Spondias* (Anacardiaceae) (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986). *Bambusa* et *Dendrocalamus* sont des Poaceae rencontrées fréquemment dans les forêts décidues humides. Un seul type floristique de forêt décidue humide a été identifié. C'est le type à *Lagerstroemia microcarpa* – *Tectona grandis* – *Dillenia pentagyna* (Pascal, 1986) (Figure I.7) (Annexes I.1 à I.4).

Les forêts décidues sèches sont caractérisées par l'abondance de *Anogeissus*, *Calycopteris*, *Terminalia* (Combretaceae), *Dalbergia*, *Pterocarpus* (Fabaceae), *Bridelia*, *Emblia* (Euphorbiaceae), *Lannea*, *Buchanania* (Anacardiaceae), *Acacia* (Mimosaceae) et *Grewia* (Tiliaceae), ainsi que *Cassine* (Celastraceae), *Ziziphus* (Rhamnaceae). Les herbacées abondantes sont *Justicia* (Acanthaceae), *Cymbopogon*, *Dendrocalamus* et *Themeda* (Poaceae). On remarquera que les savanes arborées résultant de la dégradation des forêts décidues sèches sont caractérisées par une plus grande abondance de *Phyllanthus* (Euphorbiaceae), *Wendlandia* (Rubiaceae), *Madhuca* (Sapotaceae), (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986). Les forêts décidues sèches ont été distinguées en deux types floristiques différents : le type à *Anogeissus latifolia* – *Tectona grandis* – *Terminalia alata* et le type *Anogeissus latifolia* – *Pterocarpus marsupium* – *terminalia spp.* (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986; Ramesh *et al.*, 1998).

CHAPITRE II. Matériel et Méthodes

1. Données polliniques actuelles

1.1. Choix des sites

Six missions de terrain ont été menées et 206 échantillons de surface ont été collectés entre 8° et 16°N, dans la région des Ghâts occidentaux. La collecte des échantillons a été menée selon une stratégie définie dans le but d'obtenir 1) une couverture homogène des différentes formations végétales présentes dans les Ghâts Occidentaux, et 2) un échantillonnage susceptible de fournir ensuite des spectres polliniques mettant en évidence les deux gradients climatiques majeurs du système de mousson, les gradients de pluviosité et de longueur de la saison sèche, venant compléter le gradient thermique étudié parallèlement (Bonafille *et al.*, 1999, ci-joint).

La liste des 206 sites polliniques actuels est donnée en Annexe II.1, avec les détails concernant la végétation (type de formation, dégradation, physiologie, type floristique). Sur les 206 échantillons collectés, 26 se sont révélés stériles en pollens, et n'ont donc pas fourni de spectre pollinique. Ce sont 180 spectres comptés dans le cadre de ce travail avec l'aide et le support du Laboratoire de Palynologie de l'Institut Français de Pondichéry. Le nombre de pollens comptés (Σ Pollen) ainsi que le nombre de taxons obtenus (Σ Taxa) pour chacun des échantillons non-stériles, est donné en Annexe II.1.

- **D'après la cartographie végétale**

L'échantillonnage des forêts des Ghâts occidentaux a été déterminé les cartes de végétation produites par l'Institut Français de Pondichéry (Pascal *et al.*, 1982a; Pascal *et al.*, 1982b; Pascal *et al.*, 1984; Ramesh *et al.*, 1998). La répartition des échantillons entre les différents types de végétation est indiquée sur la figure II.1. Cette figure montre la multiplication des sites dans le même type de végétation. Mais celui-ci varie en raison des contraintes de terrain.

Les forêts décidues, pour lesquelles le nombre d'échantillons stériles s'est révélé être le plus important (12), sont cependant représentées par 56 spectres polliniques. Le nombre de spectres polliniques provenant des forêts sempervirentes varie de 5 à 24. Les forêts sempervirentes de basse altitude ne permettent pas de prélèvement correct à cause de leur fort état de dégradation. C'est le cas de celles de la région de Mercara - Mysore, détruites partiellement pour l'extension des cultures de café et de thé (Ramesh *et al.*, submitted).

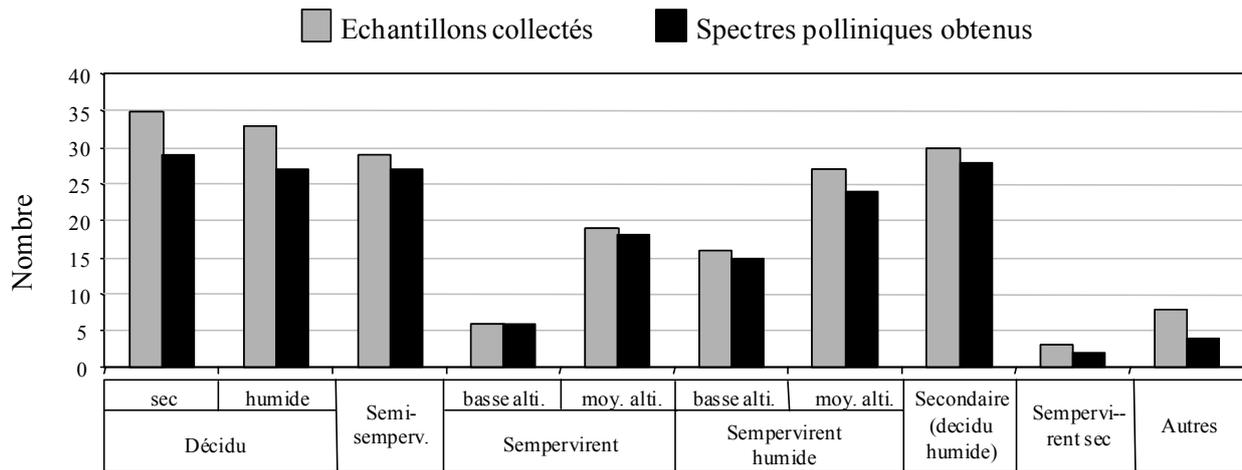


Figure II.1 : Distribution des échantillons collectés et des spectres polliniques obtenus en fonction des types de végétation échantillonnés.

Les formations secondaires (forêts de type décidu humide ; (Pascal, 1986) qui ont remplacé les forêts sempervirentes « climaciques » ont été largement échantillonnées, dans la mesure où elles constituent une végétation de retour à l'équilibre (Pascal, 1988). Les forêts sempervirentes sèches, restreintes à la région de Tirunelveli (pointe sud est de la péninsule, cf. Annexe I.4) ne sont représentées que par 2 échantillons.

Les échantillons collectés fournissent cependant un ensemble statistiquement représentatifs des types principaux de végétation.

• **D'après la cartographie des bioclimats**

La stratégie d'échantillonnage par rapport au climat s'est appuyée sur les cartes bioclimatiques de (Pascal, 1982) (Figure I.5). Les 180 spectres polliniques actuels sont distribués entre 60 et 1300 m d'altitude (Figure II.2). Ils couvrent la zone altitudinale correspondant aux formations de basse (< 900 m) et moyenne (900 – 1500 m) altitude. Ils complètent ceux de la zone de montagne étudiés dans le cadre d'un travail précédent (Sutra, 1997)

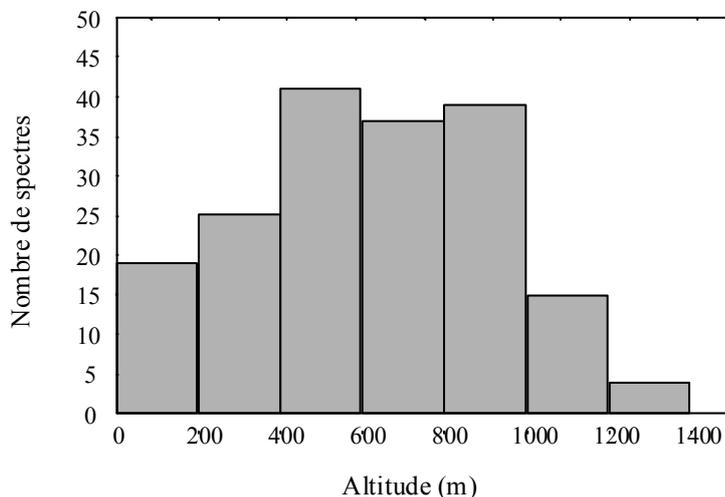


Figure II.2 : Distribution des 180 spectres polliniques actuels en fonction de classes altitudinales.

La distribution des spectres polliniques dans les domaines bioclimatiques définis par des classes de pluviométrie et de longueur de la saison sèche est présentée dans le tableau ci-après où les limites bioclimatiques dans les Ghâts occidentaux sont démarquées par des cases de couleurs gris foncé. Les cases en gris clair indiquent que la végétation naturelle dans les classes bioclimatiques correspondantes n'est plus échantillonnable car trop perturbée et/ ou remplacée par des cultures. Ces zones correspondent à la plaine du Tamil Nadu, la trouée de Palghat, le plateau de Mysore au pied des Nilgiri, la région de Sakleshpur- Hassan dans le Karnataka et les zones côtières jusqu'au versant ouest des Ghâts Occidentaux.

Pluviométrie (mm/an)		Longueur de la saison sèche (mois/an)								
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
MTCO > 16°C	>5000			1	14	2	5			
	2000-5000		22	11	17	8	26			
	1500-2000			12	8	3	12			
	1200-1500				12	5	6			
	900-1200					6	6			
	600-900						1			

Domaine climatique n'existant pas en Inde
 Région climatique où la végétation naturelle est trop dégradée pour être échantillonnée

Tableau II.1 : Répartition des 180 spectres polliniques actuels dans les domaines bioclimatiques des Ghâts occidentaux a) MTCO >15°C, b) MTCO <15°C, définis par les botanistes (Pascal, 1982).

Parmi les 180 spectres, seuls 3 ont été prélevés dans des zones où la température du mois le plus froid est <16°C (cf. carte bioclimat, Pascal, 1982). Les 177 autres spectres (MTCO >16°C) appartiennent à 6 classes de pluviosité et à 5 classes de longueur de saison sèche différentes. Le tableau II.1 montre la distribution des spectres dans les différentes classes bioclimatiques en fonction des classes de pluviométrie et de longueur de saison sèche différentes pour la région tropicale (MTCO>16°C) (8° à 16°N) à l'exclusion des zones de montagnes. Il montre comment la stratégie de collecte des spectres de surface a été conduite, guidée par le souci d'obtenir une base de données statistiquement valable pour envisager la combinaison des différentes classes de 2 paramètres à reconstruire. La base la meilleure étant pour la classe de pluviosité 2000-5000 mm/an et les différentes saisons sèches.

1.2. Méthode d'échantillonnage

La méthode d'échantillonnage de la pluie pollinique utilisée est celle décrite dans l'article (Bonnefille *et al.*, 1999) présenté au chapitre III. Elle consiste à collecter en un même site environ 20 à 30 cuillères à café de surface de sol (soient les 1-2 premiers centimètres de sol, feuilles et litière exclues) ou de coussins de mousse ou encore de poussière accumulée dans les trous d'arbres. La surface couverte par l'échantillonnage est d'environ 500 m². Dans le but d'un gain de temps, l'échantillonnage s'est fait « au hasard ». Une étude palynologique préliminaire de la pluie pollinique des forêts tropicales du Gabon (Afrique), a montré qu'en terme de représentation des taxons botaniques, les résultats obtenus par un échantillonnage « au hasard » ne sont pas significativement différents de ceux obtenus par un échantillonnage régulier de parcelles délimitées (Jolly *et al.*, 1996).

1.3. Traitements des échantillons et comptages

Les échantillons de surface de sol sont tamisés à 300 μ afin d'éliminer les particules grossières et les fragments de végétaux. Le traitement chimique appliqué ensuite, suit la méthode standard de l'acétolyse (Faegri and Iversen, 1989). Un autre tamisage à 5 μ a été réalisé dans un bain d'ultrasons pour éliminer les micro débris et augmenter ainsi la concentration en grains de pollens dans le résidu final. Monté entre lame et lamelle le résidu final est alors observé au microscope optique. Le comptage des pollens s'est fait au microscope optique sous grossissement $\times 500$ et $\times 1000$ pour la détermination des taxons. Les taxons polliniques ont été identifiés à l'aide de la collection de pollens de référence de l'Institut Français de Pondichéry et des photos et descriptions de nombreux atlas polliniques (Guinet, 1962; Huang, 1972; Nayar, 1990; Thainikainmoni, 1966; Thainikainmoni, 1984; Tissot *et al.*, 1994; Vasanthy, 1976).

Nous avons accordé une attention particulière à la diversité pollinique présente dans chaque échantillon. Ainsi, une courbe correspondant au nombre de grains comptés en fonction du nombre de taxons identifiés a été établie lors de chaque comptage (Annexe II.2). Cette courbe, qui s'apparente à la courbe aire/ espèces des botanistes permet de pousser ou de limiter un comptage en fonction de la diversité en taxons polliniques du spectre.

Lors de l'analyse du contenu pollinique des 180 échantillons de surface collectés dans les formations sempervirentes et décidues des Ghâts occidentaux, 192 taxons polliniques et deux types de spores ptéridophytes ont été identifiés. La liste des taxons identifiés est donnée dans l'annexe II.3.

1.4. Traitements statistiques des données

Parmi les méthodes statistiques utilisées pour l'analyse des données polliniques (Birks, 1985; Birks and Gordon, 1985), nous avons choisi d'utiliser l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). L'AFC est une technique descriptive/exploratoire destinée à analyser des tables simples d'ordre deux ou multiple contenant certaines mesures de correspondance entre les lignes (taxons polliniques) et les colonnes (observations) (Benzécri, 1973). Les résultats donnent une information dont la nature est proche de celle fournie par les techniques de l'Analyse Factorielle seule, et permettent d'explorer la structure de variables catégorielles incluses dans la table. Les distances euclidiennes entre les points lignes (taxons) dans un espace de n dimensions défini par le nombre de colonnes, synthétisent toute l'information concernant les similitudes entre les lignes de la table.

L'AFC présente l'intérêt de simplifier la représentation et l'interprétation de tables très importantes en déterminant un espace restreint à 1, 2 ou 3 dimensions dans lequel sont placés les points ligne (taxons) de sorte à conserver toute l'information ou presque, concernant les différences entre les lignes. Une autre manière d'appréhender l'AFC revient à considérer qu'il s'agit d'une manière de décomposer la statistique globale du Chi² (où Inertie = Chi² / N Total) en identifiant un nombre restreint de dimensions dans lesquelles les écarts aux valeurs théoriques peuvent être représentés. L'objectif de l'AFC est de décomposer la variance totale de façon à permettre une représentation des variables sur quelques dimensions, permettant de reconstruire l'essentiel de la matrice de variance/covariance des variables.

Cette méthode de l'AFC a été largement utilisée (Jolly and Bonnefille, 1992; Jolly *et al.*, 1994; Vincens *et al.*, 1997). Récemment, elle a permis de déterminer des taxons polliniques marqueurs de végétations et de mettre en évidence les gradients climatiques responsables de la distribution actuelle des types de végétations en Inde du sud (Anupama *et al.*, 2000; Barboni and Bonnefille, submitted; Barboni *et al.*, submitted; Bonnefille *et al.*, 1999).

2. Données climatiques

Afin de mettre en évidence les variations du signal pollinique en fonction des gradients climatiques, il est nécessaire de connaître le climat du site où chaque échantillon de surface a été collecté. Le climat des sites polliniques actuels est estimé à partir des données climatiques de stations météorologiques proches, par une méthode d'interpolation spatiale basée sur l'utilisation de réseaux neuronaux artificiels. Cette technique permet d'obtenir pour chaque spectre pollinique à partir de leurs coordonnées géographiques, les températures et précipitations moyennes mensuelles et un pourcentage d'ensoleillement (Guiot *et al.*, 1996). Pour calibrer la fonction d'interpolation, nous avons utilisé **deux** fichiers climatiques distincts.

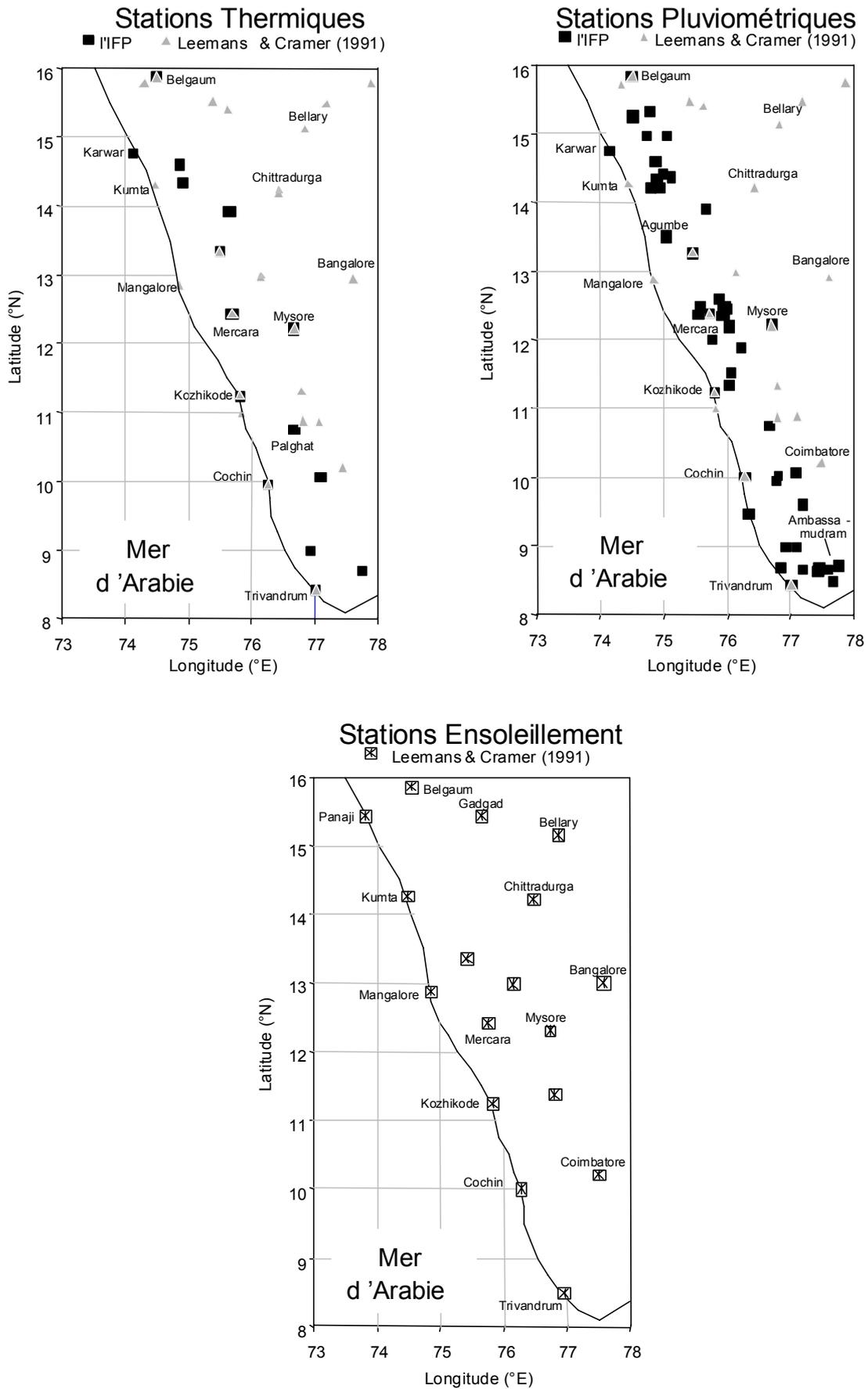


Figure II.3 : Localisation des stations météorologiques IFP et LC ayant fourni les données pour l'interpolation du climat aux sites polliniques actuels des Ghâts occidentaux, Inde du Sud.

2.1. Description des fichiers de données

- **Les données de l'IFP**

Les données météorologiques utilisées pour l'interpolation spatiale du climat sont de deux types. Une première série correspond aux données thermiques et pluviométriques réunies par l'Institut français de Pondichéry. Seules celles provenant des stations météorologiques les plus proches des sites polliniques actuels ont été considérées. Ainsi, on dispose des enregistrements mensuels de 16 stations pour la température et de 49 stations pour les précipitations, situées entre 8° et 16°N et entre 74° et 78°E (Figure II.3).

Les enregistrements varient entre 10 et 33 ans pour la température et entre 29 et 79 ans pour la pluviométrie et renseignent des périodes de temps différentes depuis 1901 jusqu'aux années 80 (Annexe II.4). Pour chaque station les moyennes mensuelles des températures et précipitations ont été calculées.

- **Les données du fichier global**

La seconde série de données provient du fichier climatique mondial compilé et homogénéisé par (Leemans and Cramer, 1991). Pour le sud de l'Inde entre 8° et 16°N et entre 74° et 78°E, ce fichier comprend les valeurs moyennes mensuelles de température et de pluviosité pour 22 stations pour la période 1960-1990 (Annexe II.5).

La fonction d'interpolation du climat pour l'Inde du Sud et plus particulièrement pour la région des Ghâts Occidentaux est calibrée en fonction de ces deux bases de données climatiques, Climat –IFP et Climat –LC. Les enregistrements climatiques IFP étant nombreux dans les Ghâts, apportent une précision supplémentaire sur le climat de cette région. Le fait que ces enregistrements ne correspondent pas à des périodes de temps identiques (données non homogénéisées sur les mêmes périodes de 30 ans) entraîne obligatoirement une erreur due à la variabilité séculaire du climat décrite au chapitre I. Cependant cette erreur (non estimée) est considérée comme inférieure à celle qui serait engendrée par l'utilisation d'un trop faible nombre de stations. Les stations météo du fichier (Leemans and Cramer, 1991), bien que fournissant des données climatiques homogénéisées, sont localisées plutôt sur la côte ouest et dans les plaines à l'est des Ghâts, souvent plus loin des sites polliniques que celles de l'IFP.

2.2. Méthode d'interpolation du climat aux sites polliniques

- **Utilisation des réseaux neuronaux artificiels**

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation spatiale du climat. On peut utiliser un rayon d'interpolation linéaire de distance D km par exemple (Chalié *et al.*, 1990; Guiot, 1987). Ici, on a choisit d'utiliser une méthode basée sur l'utilisation de Réseaux Neuronaux Artificiels (*Artificial Neural Network – ANN*). L'avantage théorique des ANN par rapport aux approches statistiques traditionnelles réside dans la non-linéarité du système, et dans sa capacité à trouver une solution pour des problèmes particulièrement complexes, quand l'opérateur n'a pas de connaissance *a priori* du problème. Cette méthode a été récemment introduite en palynologie (Peyron *et al.*, 1998), en dendrochronologie (Guiot *et al.*, 1995; Keller *et al.*, 1997) et en paléoocéanographie (Malgren and Nordlund, 1997a; Malgren and Nordlund, 1997b).

Le type de réseau retenu ici est un réseau à couche cachée avec une fonction d'apprentissage retropropagée pour réseau à gradient utilisant un moment et un coefficient d'apprentissage adaptatif (Caudill and Butler, 1992). La fonction d'activation dans les réseaux de neurones est une fonction sigmoïde qui introduit la non-linéarité. Nous ne détaillerons pas ici la structure des réseaux de neurones, déjà explicitée dans plusieurs travaux antérieurs (Guiot *et al.*, 1996; Keller, 1999; Peyron *et al.*, 1998).

La méthode d'interpolation du climat utilisant les ANN s'apparente à une régression multiple non linéaire, qui permet d'estimer à partir des coordonnées géographiques longitude, latitude et altitude (variables d'entrée, régresseurs), les températures, précipitations et ensoleillement moyens mensuels (variables de sortie) pour un site donné (Guiot *et al.*, 1996; Peyron *et al.*, 1998). Cette fonction d'interpolation est ajustée (calibrée) à partir d'un signal de référence (ici ce sont les données de température, précipitation et ensoleillement observées à la latitude, longitude, altitude des stations météorologiques) afin que les variables estimées soient les plus proches possibles des observations. Beaucoup d'itérations sont nécessaires pour atteindre les meilleures valeurs estimées. Une fois la fonction calibrée, l'interpolation du climat aux sites polliniques pour lesquels on ne dispose pas d'observations météorologiques, sera alors significative.

Les étapes de la procédure

1. A partir du fichier de régresseurs IFP ou LC ou des deux combinés, on effectue 1000 itérations sur la base d'une initialisation aléatoire, c'est à dire avec des coefficients de biais et de poids non définis. Cette étape donne une première estimation des valeurs moyennes mensuelles et permet d'estimer les coefficients de biais et de poids servant à minimiser les écarts entre variables observées et variables estimées. La corrélation moyenne obtenue entre variables observées et variables estimées est généralement faible.
2. La seconde étape consiste à effectuer sur le fichier de régresseurs un plus grand nombre d'itérations (10000) sur la base des coefficients de biais et de poids estimés durant la première étape. En augmentant les itérations, on augmente la corrélation entre les variables estimées et observées. Si les variables estimées sont trop proches des variables observées (*overfitting*), le risque est d'obtenir une mauvaise estimation pour de nouvelles données. On effectue donc une vérification (simulation) sur un certain nombre de stations (tirage aléatoire). Si l'erreur de vérification devient trop importante, le nombre d'itérations doit être réduit. Cette étape produit un second fichier de biais et de poids.
3. La troisième étape revient à effectuer une nouvelle série de 1000 itérations sur la base des coefficients de biais et de poids estimés durant la seconde étape. La corrélation moyenne entre variables observées et estimées est généralement inférieure à celle obtenue précédemment, mais la fonction de transfert est ajustée pour l'estimation à partir de nouvelles données.

Procédures de contrôle des résultats

Le contrôle des résultats se fait par deux procédures : l'arrêt prématuré (*early stopping*) et la méthode *bootstrap*. Dans ces deux procédures, l'ensemble des données est divisé en deux sous-ensembles déterminés de manière aléatoire. Le premier sous-ensemble est utilisé pour entraîner le réseau, i.e. calibrer la relation coordonnées géographiques/Climat. Le second est utilisé pour valider le modèle calculé sur le premier sous-ensemble.

Early stopping – selon la théorie, l'erreur sur le sous-ensemble de calibration doit diminuer au cours de l'apprentissage. Sur l'ensemble de vérification, pendant la phase initiale de l'apprentissage, l'erreur doit, elle aussi diminuer. Puis, lorsque le réseau commence à surajuster les données (*overfitting*), l'erreur sur le sous-ensemble de vérification commence à augmenter. Le nombre optimum d'itérations est alors facile à déterminer : il correspond à l'itération pour laquelle l'erreur minimale sur le sous-ensemble de vérification a été atteinte [Finnoff, 1993 #253, cité par (Keller, 1999)].

Bootstrap – La reproductibilité des résultats obtenus peut être contrôlée par la méthode bootstrap (Efron, 1979; Efron, 1983). La méthode bootstrap appliquée aux réseaux de neurones est basée sur l'extraction aléatoire d'un grand nombre de sous-ensembles d'observations dans un premier temps. Dans un deuxième temps, un réseau est calibré sur chaque sous-ensemble. Enfin, les paramètres de ces réseaux sont vérifiés sur les observations non-utilisées pendant la calibration. Cinquante sous-échantillons sont aléatoirement tirés au sort, ce qui fournit 50 séries sorties estimées. Le résultat final est présenté sous la forme d'une médiane et des 90% d'intervalle de confiance, ce qui permet d'estimer la stabilité des résultats.

Nous aurions pu vérifier à l'aide de nouvelles stations météo que la corrélation entre climat observé et climat interpolé est bonne. Cependant, nous avons constaté que nous disposions d'un trop faible nombre de stations météo pour ce genre de vérification. Ainsi, les données des 10 stations IFP et celles des 22 stations du fichier LC ont été utilisées pour calibrer la fonction d'interpolation de la température. La fonction a ensuite été appliquée à ces mêmes stations pour vérification. Pour améliorer la corrélation entre observations et estimations des précipitations, les fichiers Climat –IFP et –LC ont également été combinés. Pour l'ensoleillement, calibration et vérification se sont faites à partir du fichier Leemans et Cramer (1991) uniquement.

2.3. Choix des paramètres climatiques pour l'Inde du Sud

Les résultats de l'interpolation des paramètres climatiques sont présentés sous forme de graphiques exprimant les valeurs moyennes observées aux stations météo en fonction des valeurs interpolées à ces mêmes stations.

- **Température**

La température s'est avérée être le paramètre météorologique le plus facile à estimer. En effet, c'est pour la température que les meilleurs coefficients de corrélations ont été obtenus entre valeurs observées et valeurs interpolées. Pour la température du mois le plus froid (MTCO, °C) la corrélation linéaire est de 0.98 (Figure II.4). L'histogramme des fréquences des résidus n'est pas symétrique, mais 80% des stations ont un résidu compris entre -1°C et +1°C. D'autre part, l'erreur moyenne et donc le biais d'estimation est très faible (0.3°C). On peut donc dire que le modèle d'interpolation de la température est satisfaisant.

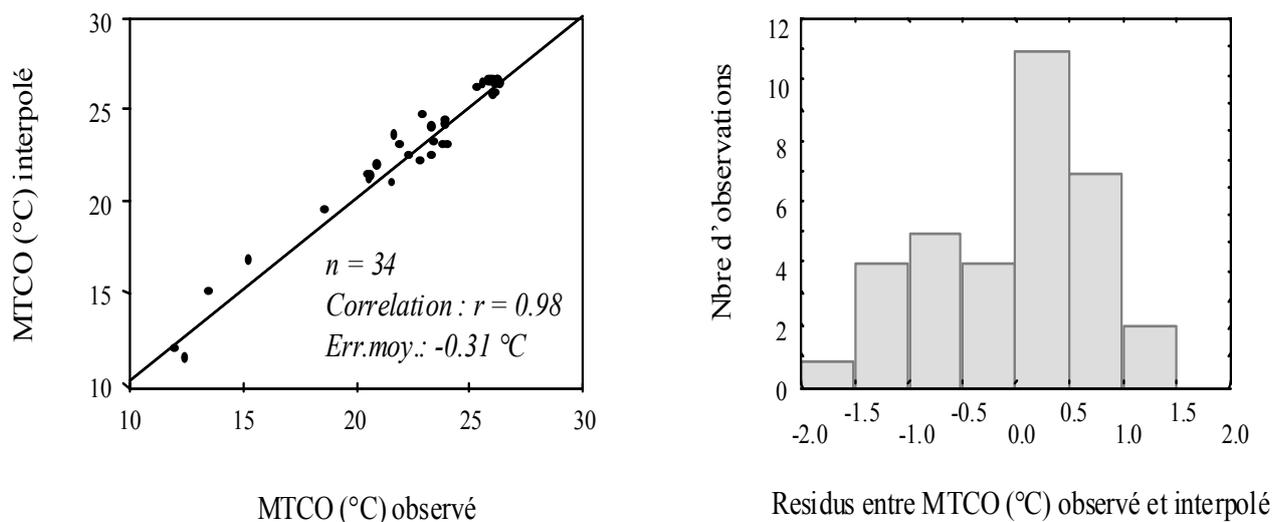


Figure II.4 : Corrélation et résidus entre les valeurs de température du mois le plus froid (MTCO) observées et interpolées, pour les 34 stations thermiques ayant servi à la calibration.

• Précipitations

La mise au point de la fonction d'interpolation pour les précipitations a nécessité une procédure particulière. Pour obtenir des estimations valables, il a fallu distinguer chacune des 74 stations pluviométriques, non plus seulement en fonction des paramètres latitude, longitude et altitude, mais aussi en fonction du régime pluviométrique de la région à laquelle elles appartenaient. En effet, on peut obtenir des montants annuels de pluie identiques avec 3 régimes distincts (Figure II.5). Ainsi les stations soumises au régime de mousson d'été avec un pic en juillet (par exemple Agumbe et les stations situées sur la côte Ouest et le versant occidental des Ghâts) ont été distinguées de celles soumises au régime de mousson d'hiver avec un pic en novembre (par exemple Ambassamudram à la pointe de la péninsule) et distinguées de celles soumises au régime caractérisé par deux saisons des pluies avec un petit pic en juillet et un autre en novembre (par exemple Mysore et les stations situées sur le plateau du Karnataka et le versant Est des Ghâts). L'ajout de ce quatrième régresseur à la fonction d'interpolation a permis d'obtenir une corrélation linéaire de 0.83 entre précipitations moyennes annuelles observées et interpolées (au lieu de 0.59, obtenu sans distinguer par les régimes pluviométriques) (Figure II.6).

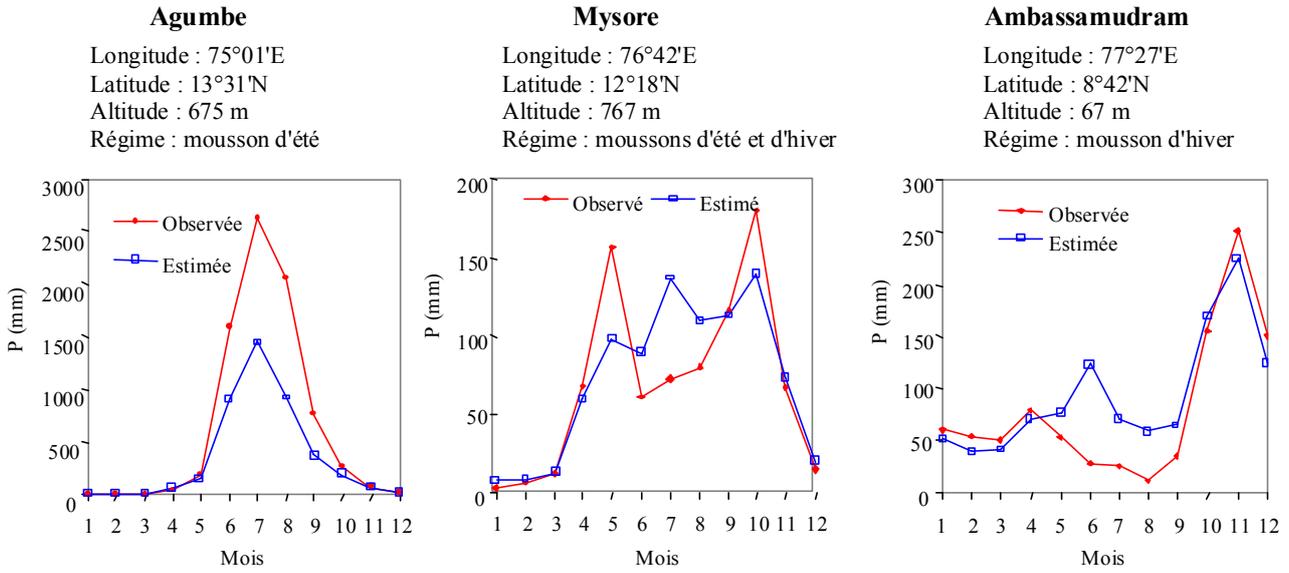


Figure II.5 : Distribution des précipitations sur l'année observées et interpolées, pour trois stations soumises à des régimes pluviométriques différents.

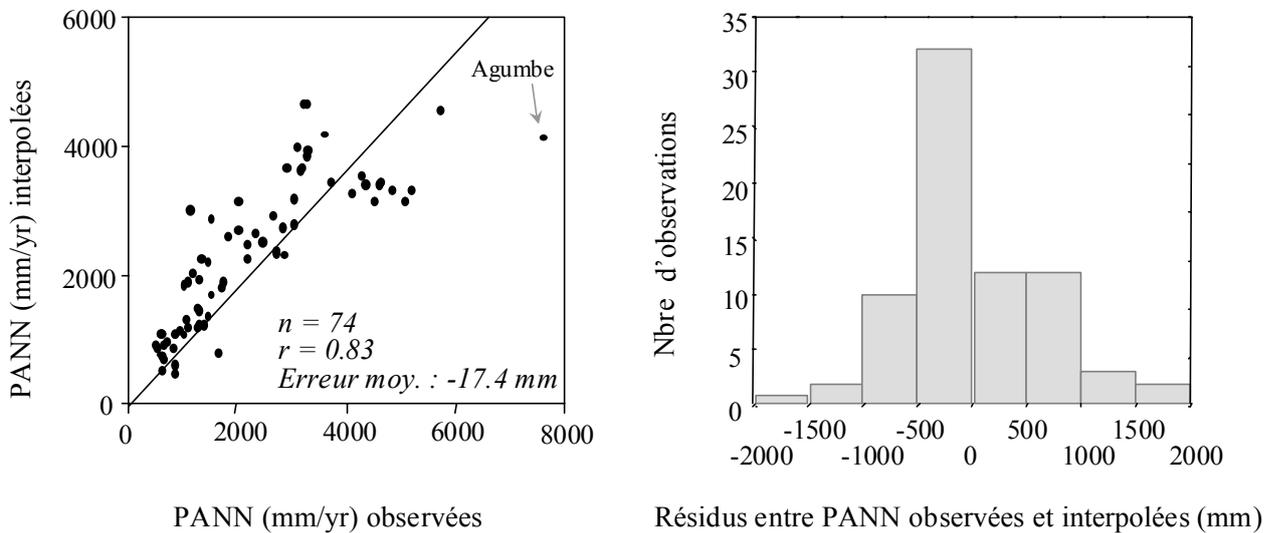


Figure II.6 : Corrélation et résidus entre les valeurs observées et interpolées, pour les 74 stations pluviométriques utilisées pour la calibration des précipitations avec distinction des régimes pluviométriques.

Bien que les précipitations pour les stations qui enregistrent des montants annuels largement supérieurs à 4000 mm/an (e. g. Agumbe), soient largement sous-estimées par l'interpolation, l'histogramme des fréquences des résidus montre que 60% des individus ont un résidu compris entre -500 et +500 mm seulement. L'erreur moyenne est très faible (-17 mm). On obtient des résultats satisfaisants pour l'interpolation des précipitations pour les moyennes annuelles, sauf dans le cas de pluviométries élevées (> 4000 mm/an) qui sont sous-estimées (Figure II.5).

En ce qui concerne la distribution des précipitations dans l'année, on peut voir sur la Figure II.5, que les maxima sont bien identifiés en juillet pour les stations soumises au régime pluviométrique de la mousson d'été (Agumbe) et en novembre pour celles soumises au régime de la mousson d'hiver (Ambassamudram), mais les montants de pluies sont sous-estimés.

On peut donc dire que la saisonnalité est plutôt bien reproduite pour les stations soumises au régime unimodal de mousson d'été (mousson sud-ouest avec un pic en juillet, e.g. Agumbe) (Figure II.5). La saisonnalité est relativement bien reproduite pour les stations soumises au régime de mousson d'hiver (mousson du nord-est avec un pic maximum en novembre, e.g. Ambassamudram) et faiblement reproduite pour les stations soumises aux pluies de mousson d'été et d'hiver (régime bimodal comme dans la région orientale du plateau de Mysore, e. g. Mysore).

- **Coefficient d'humidité E/PE**

Le coefficient d'humidité a été calculé à l'aide du modèle de Biome 1 (Prentice *et al.*, 1992), à partir des valeurs mensuelles de température, précipitation, ensoleillement, de la latitude des sites et des valeurs estimées de la capacité de rétention en eau des sols. Ce coefficient, qui correspond au rapport de l'évaporation réelle sur l'évapotranspiration potentielle, est estimé en prenant en compte la capacité de rétention en eau des sols. Cette capacité de rétention est imputée à la texture des sols, évaluée sur la base des informations digitalisées par Zobler (grille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) (Zobler, 1986) à partir de la carte des sols de la FAO (FAO/UNESCO, 1974). L'algorithme de calcul est donné par (Prentice *et al.*, 1993).

La corrélation linéaire obtenue entre les valeurs d'E/PE observées (aux 14 stations météo du fichier LC uniquement, fournissant les données d'ensoleillement) et interpolées est de 0.77 (Figure II.7). Elle est significative à 98% avec $P < 0.002$. L'histogramme des fréquences des résidus est symétrique et 57% des stations ont un résidu compris entre -5% et +5%. L'erreur moyenne est inférieure à 1% indiquant un faible biais. La fonction d'interpolation de E/PE est donc satisfaisante.

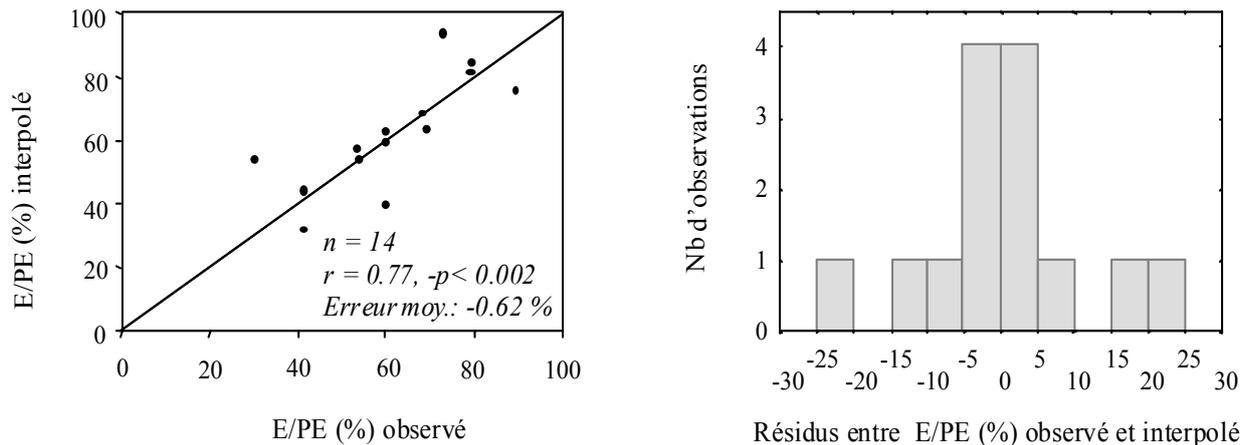


Figure II.7 : Corrélation et résidus entre les valeurs du coefficient d'humidité observées et interpolées, pour les 14 stations fournissant les données d'ensoleillement.

En conclusion : l'interpolation des paramètres météorologiques aux sites polliniques a nécessité une adaptation particulière au contexte de l'Inde. On ne disposait pas aux stations IFP de données d'ensoleillement. On a donc calibré les fonctions en ajoutant aux données météo des stations IFP, nombreuses dans la région des Ghâts, celles des stations de Leemans & Cramer (1991). La vérification des fonctions n'a donc pas pu être effectuée sur de nouvelles stations, mais sur ces mêmes stations ayant servies à la calibration. Cependant, on peut considérer les résultats comme valides dans la mesure où à chaque étape de l'interpolation par la méthode des réseaux neuronaux, une vérification par la méthode Bootstrap est appliquée (Peyron *et al.*, 1998).

2.4. Répartition des spectres dans les domaines climatiques

Les valeurs de température [température moyenne annuelle (TANN, °C) et température moyenne du mois le plus froid (MTCO, °C)], de précipitations annuelles (PANN, mm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %), interpolées aux 180 sites polliniques actuels dans les Ghâts occidentaux sont données en Annexe II.6. Nous représentons ici la distribution des 180 spectres dans les classes de température, pluviométrie annuelle et coefficient d'humidité E/PE.

La distribution des 180 spectres en fonction de la température moyenne annuelle (Figure II.8) montre que l'on dispose d'environ 25 spectres pour la gamme de températures (TANN) comprises entre 21° et 28°C. Les températures 19°-20° et 20-21°C sont moins bien renseignées avec seulement 5 et 6 spectres respectivement. La répartition des spectres en fonction de la température du mois le plus froid montre une distribution assez semblable avec en moyenne 20-25 spectres pour toutes les classes de MTCO entre 19° et 25°C, sauf pour les classes 22°-23°C où il n'est que de 15 spectres et les classes 17°-19°C, où il est de 5 et 6 spectres seulement.

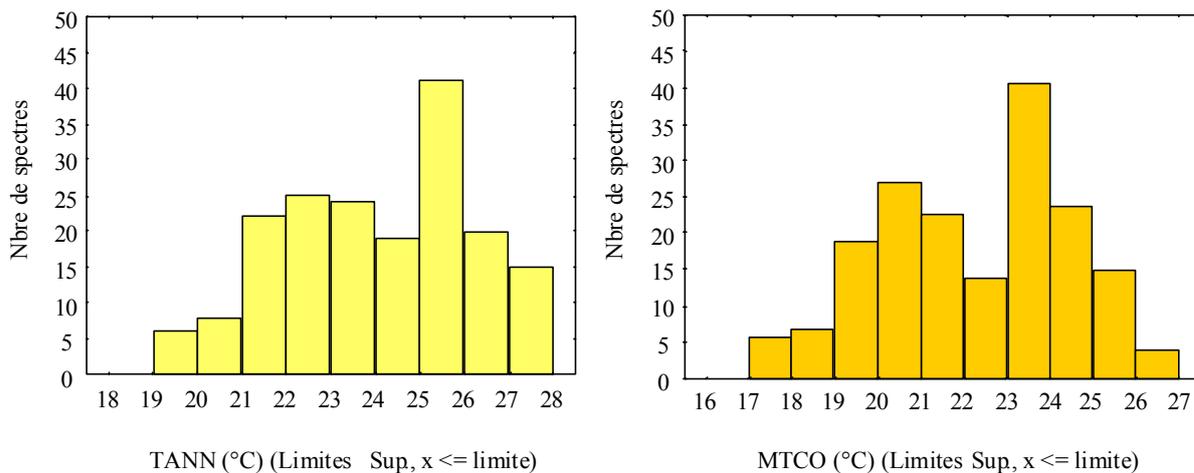


Figure II.8 : Distribution des 180 spectres actuels en fonction de classes de Température interpolée (TANN, Température annuelle, °C et MTCO, Température Moyenne du mois le plus froid, °C).

Les histogrammes présentés dans la Figure II.8 montrent que l'on dispose de spectres polliniques actuels qui renseignent toutes les gammes de pluviométries comprises entre 1000 et 6000 mm/an. La majorité (90%) des spectres renseigne cependant une pluviométrie comprise entre 2000 et 3500 mm/an. Les classes de pluviométries >4500 mm/an sont renseignées en moyenne par 5 spectres. Les classes de pluviométrie >4500 mm/an sont moins fournies en spectres ce qui s'explique par le fait que notre modèle d'interpolation de la pluviosité reproduit difficilement les montants >4000 mm/an et par le fait que les pluviométries >5000 mm/an ne se produisent que dans des zones très localisées dans les Ghâts occidentaux (e. g. Agumbe, Anshi).

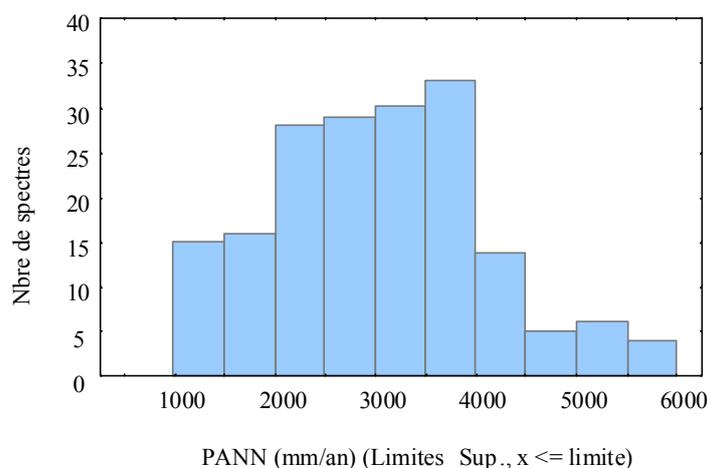


Figure II.9 : Distribution des 180 spectres polliniques actuels en fonction de classes de pluviométrie annuelle (PANN, mm/an) interpolée.

La distribution des spectres en fonction du coefficient d'humidité E/PE est plus irrégulière (Figure II.10). On dispose d'un nombre important de spectres polliniques pour les classes de E/PE comprises entre 55% et 75%, et comprises entre 85% et 90%. Le faible nombre de spectres obtenus pour un coefficient E/PE compris entre 75% et 80%, s'explique par le fait que nous n'avons pas échantillonné la région située au pied du massif des Nilgiri.

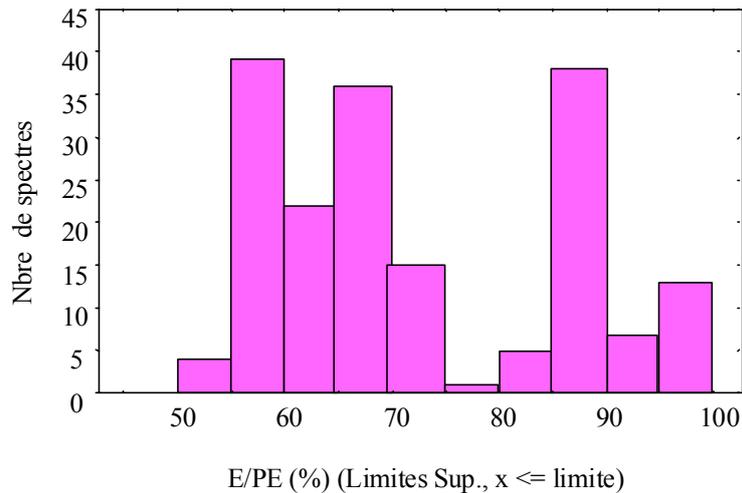


Figure II.10 : Distribution des 180 spectres actuels en fonction de classes de E/PE (%) interpolé.

La distribution des 180 sites polliniques actuels dans les domaines climatiques globaux définis par la température moyenne annuelle et les précipitations moyennes annuelles est illustrée dans la Figure II.11.

D'après (Whittaker, 1975), le domaine tropical est défini par une température annuelle moyenne (TANN) supérieure à environ 18°C. Les 180 sites polliniques actuels des Ghâts occidentaux appartiennent donc au domaine tropical. La pluviométrie (PANN) aux sites polliniques varie de 1000 et 6000 mm/an, et correspond aux domaines climatiques tropicaux des savannes herbacées, savannes arborées, forêts saisonnières et forêts humides (IPCC, 1995).

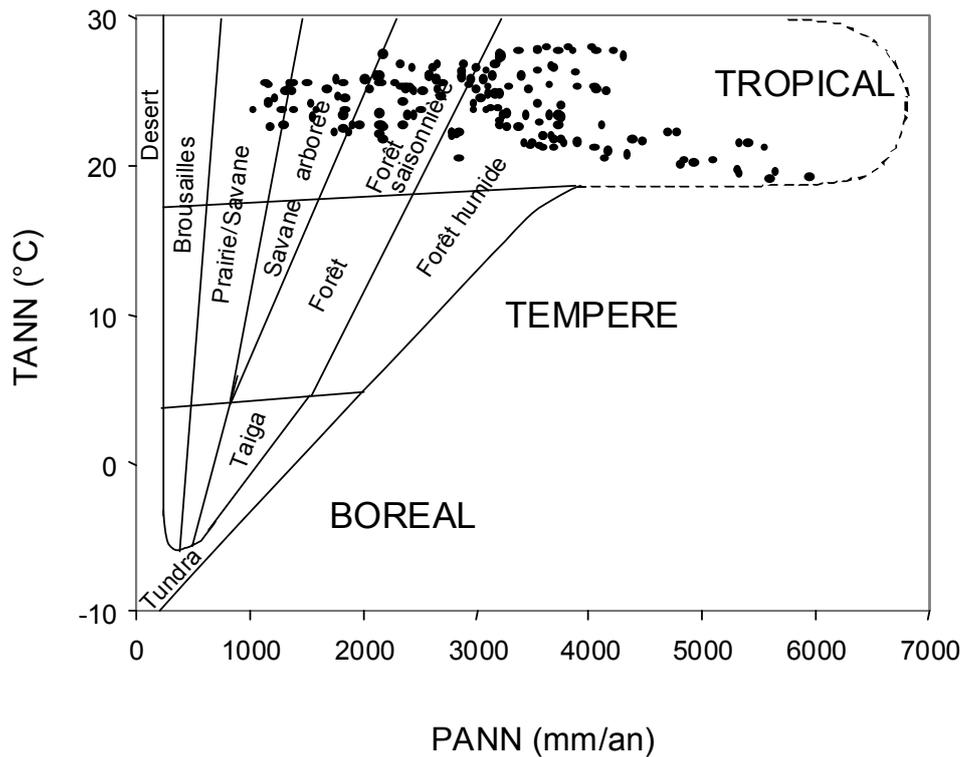


Figure II.11 : Distribution des 180 sites polliniques dans les domaines climatiques définis par (Whittaker, 1975). Relation entre climat et végétation.

Le calcul des paramètres climatiques nous permet de présenter la distribution des 180 sites polliniques actuels dans les domaines climatiques qui définissent les biomes déterminés par des valeurs limites de température moyenne du mois le plus froid MTCO et du coefficient d'humidité E/PE (Figure II.12). Sur cette figure sont également reportés les noms des biomes déterminés pour les végétations tropicales dans le modèle de Biome1 (Prentice *et al.*, 1992) et les types de végétations cartographiés par les botanistes aux sites polliniques.

Il apparaît que pour l'Inde du Sud, le modèle de Biome1 identifie seulement 3 groupes alors qu'il en existe beaucoup plus dans la végétation. Les forêts décidues, semi-sempervirentes et sempervirentes des Ghâts occidentaux, qui pourtant présentent des caractéristiques physiognomiques, phénologiques et floristiques différentes sont toutes regroupées dans un seul biome, le biome Forêt tropicale sèche/Savane défini par un $MTCO > 15^{\circ}\text{C}$ et $45\% < E/PE < 80\%$ (Prentice *et al.*, 1992).

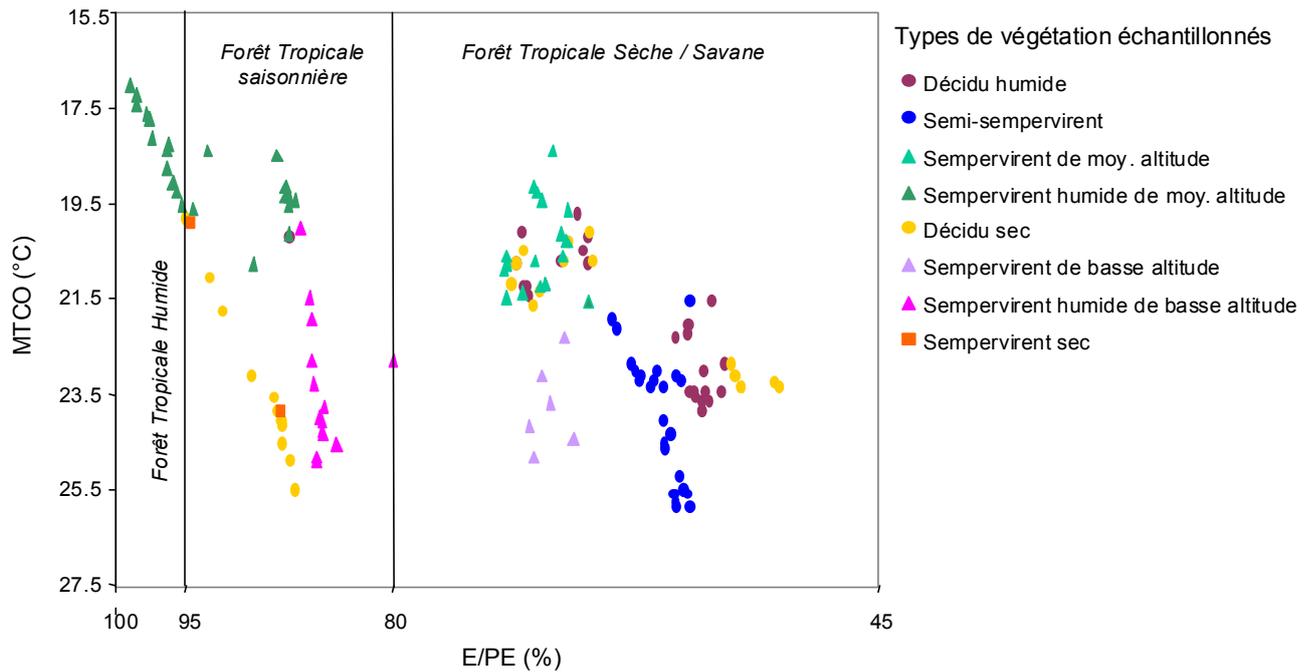


Figure II.12 : Distribution des 180 sites polliniques dans les domaines de biomes définis par (Prentice *et al.*, 1992). Les différents signets correspondent aux types de végétation échantillonnés dans les Ghâts occidentaux, Inde du Sud.

Un travail reste donc à faire sur la biomisation des végétations de l'Inde du Sud. Nous proposons dans les chapitres suivants une analyse détaillée du signal pollinique des forêts tropicales de l'Inde du sud. L'analyse de la relation pollen-végétation et pollen-climat devrait contribuer à une meilleure caractérisation palynologique de la végétation sous climat de mousson et permettre ainsi de déterminer des limites bioclimatiques adaptées pour produire des modélisations réalistes du couvert végétal dans cette région du globe.

CHAPITRE III. Résultats et discussion

Dans ce chapitre sont présentés en section 1, les résultats obtenus par une série d'analyses factorielles (AFC) réalisées sur l'ensemble de notre dataset. Ces résultats préliminaires nous ayant conduit à étudier séparément les différents paramètres du signal climatique enregistré dans la pluie pollinique, nous présenterons l'analyse du signal de la température en section 1.1, des précipitations en section 1.2 et de la longueur de la saison sèche en section 1.3. La relation pluie pollinique et végétation a été discutée en détail en section 2. Une synthèse des résultats sur la pluie pollinique et sa relation avec le climat et la végétation est proposée en section 3.

1. Pluie pollinique actuelle et climat

Dans le but de déterminer les facteurs pouvant expliquer le maximum de la variance entre les spectres polliniques actuels du sud de l'Inde, nous présentons une série de traitements statistiques en utilisant la méthode de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

- **AFC sur l'ensemble du dataset**

Une AFC a d'abord été effectuée sur un dataset composé à la fois des 180 spectres actuels de notre étude sur les Ghâts occidentaux (60 et 1300 m d'altitude), complété par 36 spectres actuels provenant des massifs des Nilgiris, Palni et Anamalai (1250-2400 m) qui élargissent le gradient altitudinal (Bonnefille *et al.*, 1999). Les 216 spectres contiennent 219 taxons polliniques (plantes aquatiques, introduites et/ou cultivées exclus).

Une première AFC entre les 216 spectres et 219 taxons a mis en évidence des biais importants dû à la sur-représentation de *Poecilonuron*, *Piper* et *Dodonea viscosa* dans plusieurs spectres. La sur-représentation de *Poecilonuron* dans les échantillons WG158, WG159, WG160 et WG161 est en accord avec l'abondance de *Poecilonuron indicum* dans la végétation aux sites échantillonnés (Arora, 1966; Pascal, 1988). Cependant cette abondance ponctuelle de *Poecilonuron* couvre un signal plus général (voir article (Barboni and Bonnefille, submitted) présenté ci-après). La sur-représentation de *Piper* dans le spectre WG95 et de *Dodonea viscosa* dans WG72 reflète plutôt un problème d'échantillonnage. Nous avons choisi d'exclure du dataset le spectre WG72 et les taxons *Poecilonuron*, *Piper* ainsi que le taxon Cyperaceae qui reflète des conditions très locales.

Une deuxième AFC a donc été effectuée avec une matrice de 215 spectres et 216 taxons. Dans les résultats de cette deuxième AFC, les axes 1 et 2 expliquent 15.3% de l'inertie totale. La dispersion des spectres (observations) dans l'espace factoriel défini par les axes 1 et 2 est représentée dans la figure III.1, où les types de végétation correspondant à chaque spectre pollinique ont été distingués par des signets de couleurs différentes.

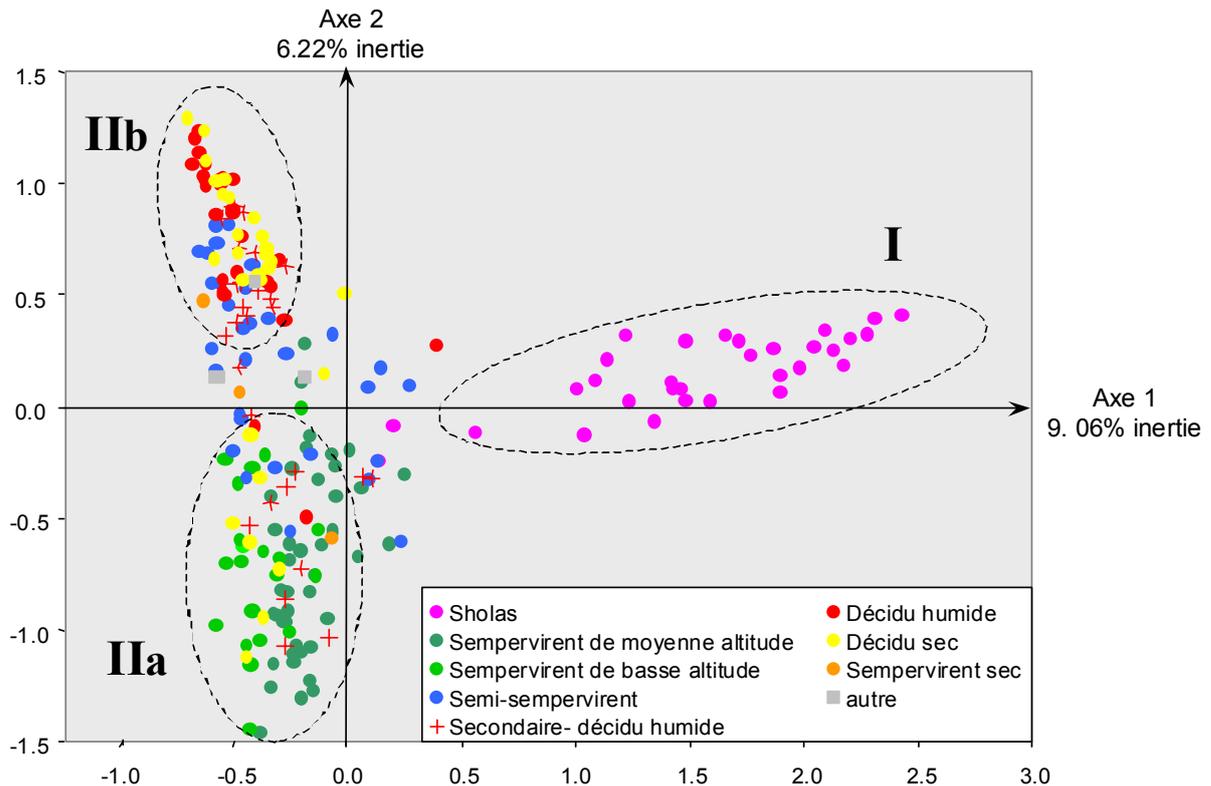


Figure III.1 : AFC entre 215 spectres et 219 taxons. Dispersion des spectres en fonction des axes factoriels 1 et 2.

La dispersion des spectres dans l'espace factoriel montre que deux groupes de spectres peuvent être clairement distingués. Le groupe I, au pôle positif de l'axe 1, rassemble les spectres provenant des forêts sempervirentes de haute altitude (sholas) localisées dans les massifs des Nilgiri, Palni et Anamalai. Le groupe II, au pôle négatif de l'axe 1, rassemble les spectres collectés dans les formations sempervirentes (sous-groupe IIa) et décidues (sous-groupe IIb) à basse et moyenne altitude, localisées dans les Ghâts occidentaux (Figure III.1). L'axe 1, qui explique 9% de l'inertie, sépare clairement les forêts de haute altitude (> 1700 m) des formations de basse et moyenne altitude (600 – 1400 m).

Nous avons représenté sur la figure III.2, la distribution des spectres polliniques en fonction de leur coordonnées factorielles sur l'axe 1 versus leur altitude respective, et versus la température du mois le plus froid interpolée. Cette représentation met en évidence la forte corrélation entre l'axe factoriel 1 et l'altitude ($R=0.78$) (Figure III.2a). La température étant pratiquement une fonction linéaire de l'altitude, il n'est pas surprenant de trouver également une forte corrélation entre l'axe factoriel 1 et la température ($R = 0.76$) (Figure III.2b). L'axe factoriel 1 peut donc être interpréter comme un gradient de température.

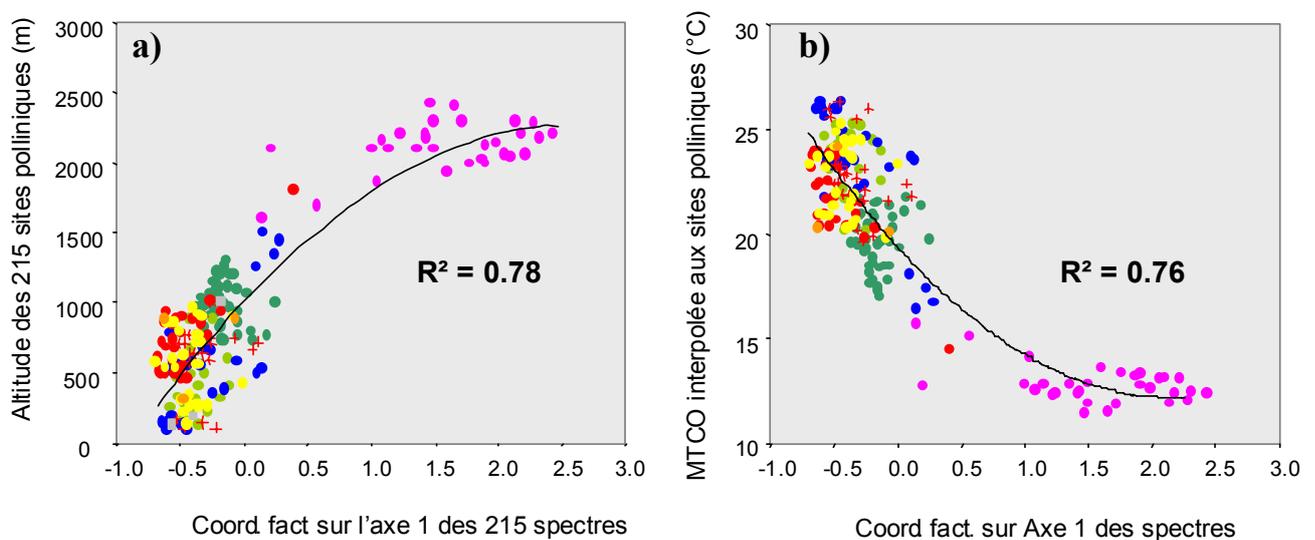


Figure III.2 : Dispersion des 215 spectres polliniques en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 1 et de leur altitude respective (a), et de la température du mois le plus froid (MTCO, °C) (b). (Légende : voir Figure III.1).

L'axe 2, qui explique 6% de l'inertie sépare les sous-groupes IIa et IIb. Le sous-groupe IIa, au pôle négatif de l'axe 2, rassemble les spectres provenant des forêts sempervirentes. Le sous-groupe IIb, au pôle positif de l'axe 2, rassemble les spectres provenant des formations décidues. Les spectres provenant des forêts semi-sempervirentes et des formations secondaires (décidues humides) sont situés entre les sous-groupes IIa et IIb dans l'espace factoriel 1*2 (Figure III.1).

La même représentation graphique a été adoptée pour faciliter l'interprétation de l'axe factoriel 2 (Figure III.3). Comme mis en évidence dans la figure III.1, l'axe factoriel 2 sépare parmi les végétations de basse et moyenne altitude, les formations sempervirentes (sous-groupe IIa) des formations décidues (sous-groupe IIb). L'axe 2 ne semble cependant pas avoir

d'influence sur la dispersion des spectres au sein du groupe I qui représente les sholas de haute altitude. Sur la figure III.3, les spectres des sholas n'ont donc pas été représentés. Cette figure met clairement en évidence la forte corrélation existant entre l'axe factoriel 2 et la pluviométrie annuelle (PANN, mm/an). L'axe factoriel 2 peut donc être interpréter comme un gradient de pluviométrie.

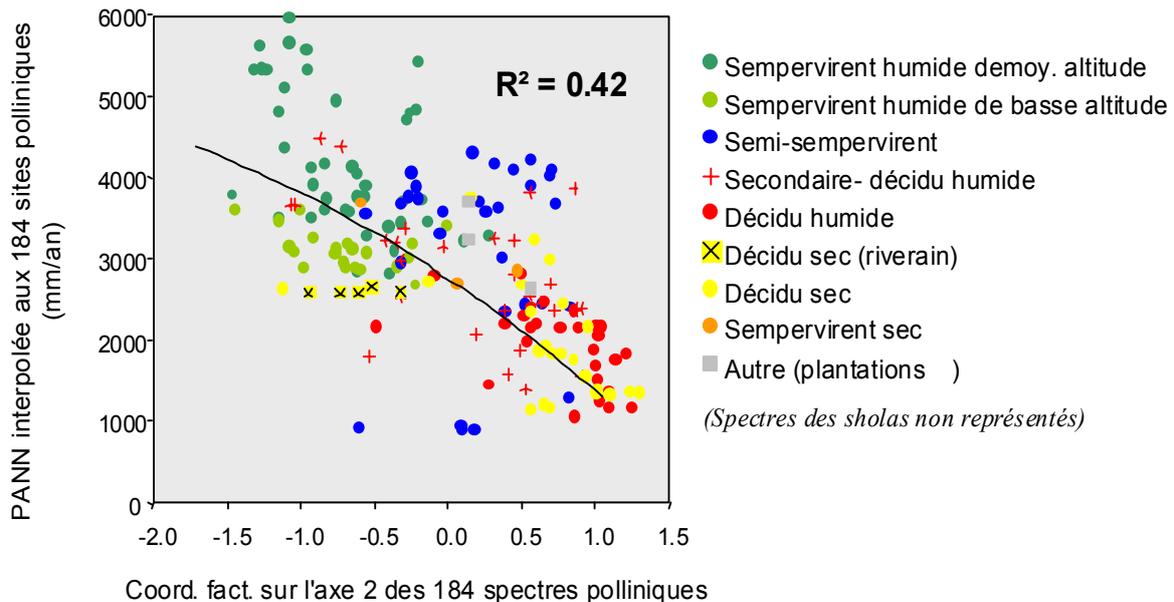


Figure III.3 : Dispersion des 184 spectres polliniques (spectres de shola exclus) en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 2 et de la pluviométrie annuelle interpolée à chacun des sites (PANN, mm/an).

La dispersion des spectres dans les espaces définis par les axes factoriels 1*3 et 2*3, n'a pas montré de schéma particulier pouvant permettre d'interpréter l'axe 3, qui ne contribue que de 4% à l'inertie totale. Sachant que la longueur de la saison sèche varie de 2 à 7 mois entre 8° et 16° de latitude N, et que les botanistes ont montré des changements importants de composition floristique au sein des forêts sempervirentes en fonction de ce facteur climatique (Pascal, 1988), il apparaît intéressant de tester si le signal climatique de la saisonnalité est marqué dans les spectres polliniques. Pour ce faire, nous avons restreint notre dataset aux spectres polliniques de basse et moyenne altitude provenant des Ghâts occidentaux seulement et effectué une nouvelle AFC avec 184 spectres.

- **AFC sur le dataset restreint**

Dans le but de mettre en évidence d'autres facteurs pouvant expliquer les différentes compositions polliniques existant, nous avons restreint le dataset initial en éliminant les spectres provenant des forêts de haute altitude.

Lors d'une première étape, les Spores trilètes, sur-représentées dans 3 spectres, ont été exclues de l'AFC. La nouvelle AFC a donc été effectuée sur une matrice composée de 184 spectres et 182 taxons. Nous présentons ici la dispersion des spectres dans l'espace factoriel défini par les deux axes principaux (Figure III.4).

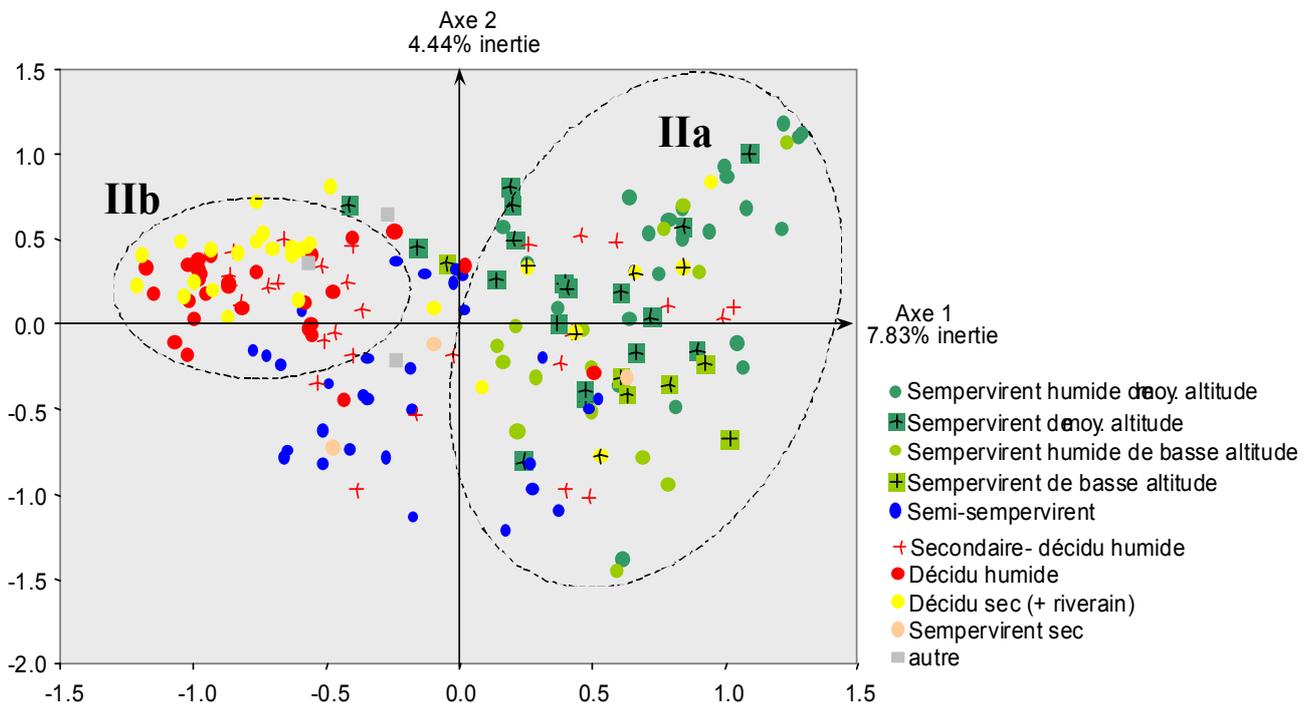


Figure III.4 : AFC entre 184 spectres et 182 taxons. Dispersion des spectres en fonction des axes factoriels 1 et 2. Les groupes IIa et IIb rassemblent les mêmes spectres que dans la figure III.1

L'axe 2 obtenu par cette nouvelle AFC sur les 184 échantillons polliniques de basse et moyenne altitude explique seulement 4.4% de l'inertie. Bien que la dispersion des spectres dans l'espace factoriel 1*2 ne semble pas présenter de tendance particulière (Figure III.4), il apparaît que l'axe factoriel 2 représente un gradient de température. En effet, la répartition des 184 spectres selon l'axe 2 et en fonction des valeurs interpolées de la température du mois le plus froid correspondant à chacun des spectres, met en évidence une forte corrélation ($R = 0.22$, significatif à 99.3%) entre axe 2 et température (Figure III.5).

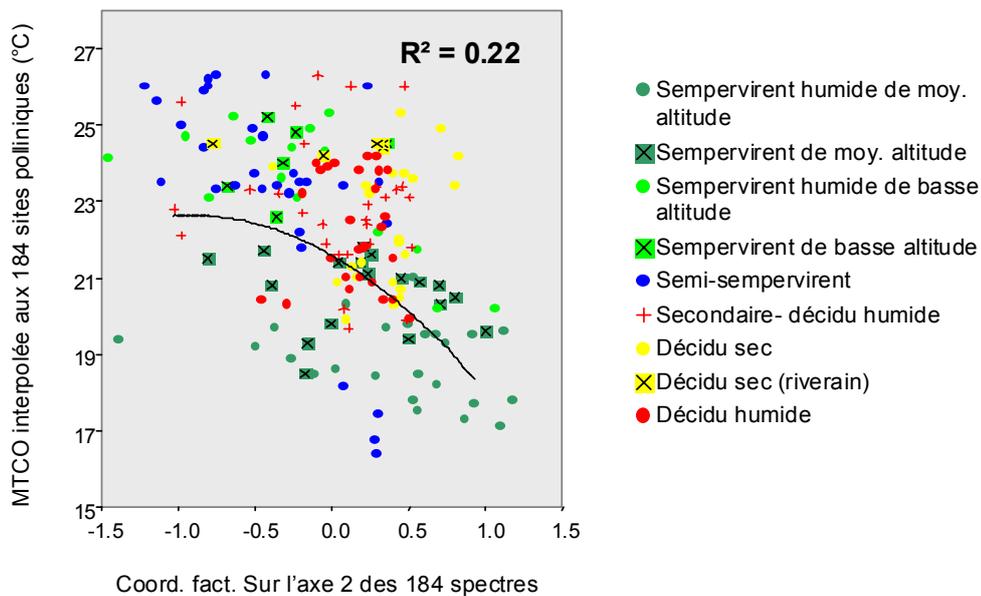


Figure III.5 : Dispersion des 184 spectres polliniques en fonction de leurs coordonnées factorielles sur l'axe 2 et de la température du mois le plus froid interpolée à chacun des sites (MTCO, °C).

Alors qu'il semblait évident que le signal de la saison sèche apparaisse comme le troisième facteur climatique majeur déterminant la distribution actuelle des taxons botaniques/polliniques, cette nouvelle AFC menée sur le dataset restreint a mis encore une fois en évidence l'importance du paramètre température, même à basse et moyenne altitude.

En conclusion :

1. Ces analyses statistiques montrent que le signal du climat est enregistré dans la pluie pollinique actuelle des forêts tropicales des Ghâts occidentaux.
2. Les AFC mettent en évidence que la composition des spectres polliniques actuels est fonction de plusieurs gradients climatiques.
3. L'AFC réalisée sur l'ensemble du dataset (215 spectres provenant des Ghâts occidentaux et des massifs des Nilgiri, Palni, Anamalai) a permis de mettre en évidence que la température est le paramètre climatique dominant, qui explique les variations importantes de composition pollinique entre les spectres des végétations situées à une altitude > 1700 m par rapport à toutes celles situées en dessous de 1400 m. Cette conclusion conduit à considérer le domaine montagnard tropical comme très particulier [Publication n°1, (Bonnefille *et al.*, 1999)].

4. Les AFC successives montrent que les différents facteurs climatiques ayant une influence sur la composition des spectres polliniques actuels sont hiérarchisés.
5. Après la température, c'est la quantité annuelle de pluie reçue qui apparaît être le facteur important qui explique les différences de composition pollinique entre les spectres des formations sempervirentes et décidues. Nous détaillerons cet aspect dans la publication n°2 (Barboni and Bonnefille, submitted).
6. La longueur de la saison sèche, qui conditionne le stress hydrique subi par les plantes ne semble pas *a priori* avoir une influence majeure sur les végétations de basse et moyenne altitude. On suppose cependant que l'influence de ce paramètre sur la composition des spectres polliniques actuels doit être marquée dans la mesure où il agit sur la composition floristique des forêts sempervirentes (Pascal, 1988). Le signal de la saison sèche dans la pluie pollinique sera présenté et discuté dans la publication n°3 (Barboni *et al.*, submitted).

Cette première série d'analyses met clairement en évidence l'influence combinée des différents paramètres climatiques qui influencent la composition pollinique des spectres actuels. Elle montre aussi qu'une stratégie de sélection des spectres du dataset doit être adoptée, pour pouvoir être en mesure de distinguer clairement l'influence séparée de chacun de ces paramètres sur la distribution actuelle des taxons polliniques, dans le but de calibrer une fonction de transfert.

Les trois parties suivantes présentent l'analyse séparée de la température, la pluviométrie et la longueur de la saison sèche sous la forme d'articles distincts.

1.1. Pluie pollinique actuelle et gradient de température

La température est le paramètre climatique majeur déterminant la distribution globale des grands types de végétation (IPCC, 1995). Dans le domaine tropical, la distribution de la végétation est déterminée par la température du mois le plus froid. En effet, des études écophysiologiques et corrélatives, basées sur une connaissance détaillée de la physiologie et de l'écologie des espèces et des types fonctionnels de plantes ont montré qu'une température moyenne du mois le plus froid de 15.5°C correspond au seuil de tolérance au froid maximum pour les plantes tropicales feuillues sempervirentes (Prentice *et al.*, 1992; Woodward, 1987).

A l'échelle de la péninsule indienne, la température diminue principalement en fonction de l'altitude : le gradient thermique est de 0.4-0.7°C pour 100 m. Les variations de température liées à l'éloignement par rapport à l'équateur sont faibles dans la bande latitudinale 10°-20°N (Critchfield, 1983). Nous avons pu estimer grâce aux données des stations météo décrites au chapitre II, que pour 8° de différence latitudinale (entre 8° et 16°N), la différence de température à la même élévation est de -1°C.

Questions

- La pluie pollinique actuelle des forêts tropicales reflète-elle les différents types de basse, moyenne et haute altitude distingués par les botanistes ?
- Dans le but de quantifier les changements climatiques du passé liés aux cycles de glaciation, quels sont les taxons polliniques marqueurs de la température pour les formations tropicales ?

- **Article à Journal of Biogeography (1999)**

(Annexe III.1)

Résumé de l'article

Nous avons analysé le contenu pollinique de 106 échantillons de surface de sol, collectés dans les forêts tropicales sempervirentes et décidues entre 6° et 13° de latitude Nord en Inde du Sud et au Sri Lanka. Les échantillons ont été collectés entre 50 et 2420 m, dans cinq régions soumises à différents régimes pluviométriques.

Dans cet article sont présentées en fonction de gradients altitudinaux, des données polliniques originales pour les forêts tropicales soumises au climat saisonnier de la mousson indienne. Une description des différents types végétation correspondant à la zone étudiée est également donnée.

Les résultats sont présentés sous la forme de diagrammes polliniques et d'analyses factorielles des correspondances (AFC). Ils mettent en évidence que les différents types de végétation sempervirents et décidus sont bien distingués par des associations polliniques distinctes. Les AFC ont permis de déterminer les taxons polliniques marqueurs de 3 types majeurs de végétation, i.e. les formations sempervirentes humides de haute altitude, sempervirentes humides de basse et moyenne altitude, et les formations décidues. Les formations sempervirentes humides de Sri Lanka ont également été séparées par les AFC, ce qui montre la différence floristique entre les végétations du Sud de l'Inde de celles de Sri Lanka.

Les forêts sont également bien identifiées par des proportions de taxons arborés supérieures à 50%, malgré le fait que les principaux composants des forêts échantillonnées, i.e. les Dipterocarpaceae et les Lauraceae soient rarement enregistrés dans la pluie pollinique.

La distinction entre les formations sempervirentes de basse, moyenne et haute altitude est en accord avec celle établie par les botanistes. Les limites botaniques, placées respectivement à 900 m et 1500 m, correspondent aux valeurs de 20°C et de 15°C de la température moyenne du mois le plus froid. Elles apparaissent clairement identifiées dans la pluie pollinique actuelle. Ce résultat justifie l'utilisation future des données polliniques dans la modélisation des biomes.

Les réponses à ces questions ayant fait l'objet de l'article ci-joint, le travail réalisé dans ce mémoire de thèse concerne plus directement la mise en évidence du signal de la pluviosité et de la saisonnalité des précipitations.

1.2. Pluie pollinique actuelle et gradient de pluviométrie

Les AFC successives réalisées sur l'ensemble du dataset pollinique actuel des Ghâts occidentaux ont mis en évidence que la température est le facteur climatique premier expliquant la distribution actuelle des taxons dans la pluie pollinique sur un gradient de 0 à 2500 m (Bonnefille *et al.*, 1999). C'est en contraignant le dataset aux seules végétations de basse et moyenne altitude que nous pouvons déterminer l'influence de la pluviométrie sur la composition de la pluie pollinique. Pour mettre pleinement en évidence le rôle du facteur pluviométrie sur la composition de la pluie pollinique actuelle des végétations des Ghâts occidentaux, nous avons sélectionné les spectres collectés dans des zones en dessous de la contrainte thermique définissant le domaine montagnard correspondant à l'altitude >1500 m, et à la température du mois le plus froid <15°C (Bonnefille *et al.*, 1999). Nous avons donc choisi les sites polliniques localisés entre 0 et 1500 m d'altitude, appartenant au domaine tropical *sensu stricto*.

Nous avons de plus sélectionné les spectres en fonction du coefficient d'humidité E/PE, afin de minimiser l'influence éventuelle du stress hydrique engendré par des longueurs de saisons sèches variables. Sur le graphique présenté dans la Figure III.6, sont reportées les valeurs de E/PE et de PANN interpolées pour chacun des 180 sites polliniques actuels dans les Ghâts occidentaux.

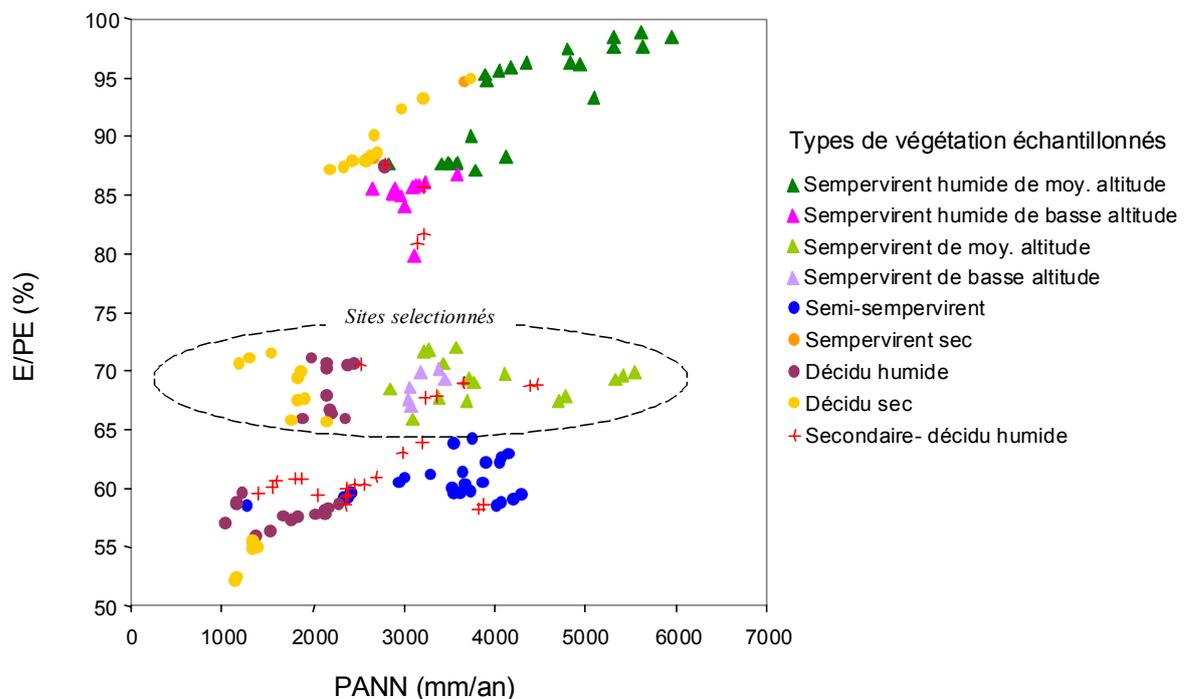


Figure III.6 : Distribution des 180 sites polliniques actuels dans les domaines climatiques définis par la pluviométrie moyenne annuelle (PANN, mm/an) et le coefficient d'humidité (E/PE, %). Les sites sélectionnés ont été indiqués.

Il apparaît que E/PE et PANN sont corrélées sauf pour les sites dont E/PE est compris entre 65% et 72%. Nous avons donc sélectionné parmi cet ensemble, les spectres polliniques qui répondent aux deux critères : $MTCO > 15^{\circ}C$ et E/PE compris entre 65% et 72%.

Il se trouve que 51 spectres polliniques actuels répondent à ces deux critères. Ces spectres proviennent des végétations localisées entre $11^{\circ}30'N-13^{\circ}20'N$. D'Ouest en Est, à la latitude de $13^{\circ}N$, la pluviométrie annuelle diminue fortement. Elle est largement supérieure à 2000 mm/an dans la zone côtière et les Ghâts, et ne dépasse pas 1200 mm/an au-delà de 60 km vers l'intérieur des terres (Pascal, 1988). D'après les botanistes, c'est ce fort gradient de pluviosité accompagné par une augmentation de la longueur de la saison sèche qui passe de 5 à 8 mois, qui détermine la transition entre les forêts sempervirentes, les forêts décidues humides et les forêts décidues sèches (Pascal, 1986; Pascal *et al.*, 1982b). A propos de la pluviométrie, les questions scientifiques posées sont les suivantes :

Questions

- Dans l'optique d'une modélisation future des végétations de l'Inde, le signal pollinique traduit-il les différences de composition floristique et de physionomie existant entre les forêts sempervirentes et les forêts décidues ?
- Le signal pollinique traduit-il les différences de physionomie existant entre les forêts décidues humides et les forêts décidues sèches ?
- A E/PE constant, la pluviométrie a-t-elle quand même une influence sur la végétation ?
- Dans le but de quantifier les changements d'intensité des pluies de mousson suggérés par les résultats des simulations de différents modèles de circulation atmosphérique globale (AGCM), quels sont les taxons polliniques marqueurs de la pluviométrie pour ces formations tropicales ?

Ces questions sont discutées dans la 2^{ème} publication « Precipitation signal in modern pollen rain from tropical forests, South India », soumis à Review of Palaeobotany and Palynology (Barboni and Bonnefille, submitted).

- **Article à Review of Palaeobotany and Palynology (soumis)**

Precipitation signal in pollen rain from tropical forests, South India

D., Barboni¹ & R., Bonnefille²

¹French Institute of Pondicherry, BP 33, Pondicherry – 605001 – India

²CEREGE, BP 80, 13545 Aix-en-Provence, France

Abstract

We have analyzed the pollen content of 51 surface soil samples collected in tropical evergreen and deciduous forests from the Western Ghats of South India sampled along a west to east gradient of decreasing rainfall (between 11°30'N-13°20'N and 75°30'E-76°30'E). Values of mean annual precipitation (Pann, mm/yr) have been calculated at each of the 51 sampling sites from a great number of meteorological stations in South India, using a method of data interpolation based on artificial neural network. Interpolated values of Pann range from 1200 to 5555 mm/yr, while mean temperature of the coldest month (MTCO) and humidity factor (E/PE, the actual evapotranspiration to potential evapotranspiration ratio), also interpolated at the pollen sites, remain constant: $MTCO > 15^{\circ}C$ and $65\% < E/PE < 72\%$.

Results, which are presented in the form of percentage pollen diagrams where samples are arranged according to increasing values of annual precipitation indicate that the climatic signal of rainfall is clearly evidenced in the modern pollen rain from tropical forests by distinct pollen associations. Numerical analyses show that annual precipitation is a major factor explaining the modern distribution of pollen taxa in this region. Pollen taxa markers of high rainfall (Pann >2500 mm/yr) are *Mallotus* type, *Elaeocarpus*, *Syzygium* type, *Olea dioica*, *Gnetum ula*, and *Hopea* type, associated with *Ixora* type and *Caryota*. Pollen taxa markers of low rainfall (Pann <2500 mm/yr) are Melastomataceae/Combretaceae, *Maytenus* type, *Lagerstroemia* and *Grewia*.

Attributes of the pollen spectra reflect well the impact of increasing mean annual precipitation on the vegetation. Indeed, when rainfall is <2500 mm/yr, percentage of arboreal pollen (AP) is <50% and proportion of evergreen taxa is <20%. When rainfall goes beyond 2500 mm/yr, percentages of AP average 70%, and proportion of evergreen taxa average 60% (up to 90%). Modern pollen rain records the increasing evergreenness and tree density that characterize the vegetation submitted to increasing rainfall. The good correlation between precipitation and proportion of evergreen taxa represented in the pollen rain leads us think that precipitation can be estimated from pollen data, although a greater dataset would be needed to sort out the climate sensitive pollen taxa.

Keywords: Modern pollen spectra; Annual precipitation; Monsoon climate.

Introduction

This is the fourth paper investigating modern pollen rain from South India. The first study focussed on an altitudinal gradient and established a clear distinction between highland vegetation under a mean temperature of the coldest month MTCO $<15^{\circ}\text{C}$ and lowland tropical vegetation (Bonnefille et al., 1999). The second study focussed also on an altitudinal gradient from the drier evergreen and deciduous vegetation of the Eastern Ghats hills of South India (Anupama et al., 2000). A more recent study analyzed the pollen response of evergreen forests receiving high rainfall amounts (>2000 mm/yr) to the seasonal aspect of the monsoon climate. It established clear distinction between wet evergreen forests experiencing a dry season <4 months, evergreen forests under a dry season of 4 to 5 months and semi-evergreen forests under dry season >8 months (Barboni et al., submitted).

The aim of this study is to focus on the relation between the precipitation amounts alone and pollen taxa distribution. Therefore, the pollen sites have been chosen so that other parameters, such as mean temperature of the coldest month and drought stress remain fixed to constant value. The precipitation signal recorded in the modern pollen rain from the tropical evergreen and deciduous forests of the Western Ghats of South India will be investigated in order to provide estimates of the monsoon rain intensity. Indeed, variations of the intensity of monsoon rain determine geographical distribution of the forest types in southwest India (Pascal, 1982).

Environmental settings

The study area is located in the Western Ghats of South India. It lies between $11^{\circ}30'\text{N}$ - $13^{\circ}20'\text{N}$ and $75^{\circ}30'\text{E}$ - $76^{\circ}30'\text{E}$, and corresponds to the coastal regions of South Kanara and Malabar, and to the Coorg and Wayanad regions on the Ghats escarpments and Mysore plateau (Fig. 1). As evidenced by the topographic profile drawn in Fig. 2*, altitude increases sharply from west to east. In the selected area, maximum elevation of the escarpments is of 1300 m and elevation of the Mysore plateau averages 850 m.

Climate

The Western Ghats are under direct influence of the Asian summer monsoon, which brings heavy rains from May to September. The arrival-withdrawal of the southwest monsoon and the limited inland penetration of the rains create strong south to north and west to east gradients of increasing dry season all over western south India. Moreover, this natural barrier creates a strong west to east gradient of decreasing rainfall (Pascal, 1982; Gadgil and Joshi, 1983; Singh, 1986; Gunnell, 1997).

* Même figure que la figure I.7 présentée dans le chapitre I.

Figure 1 : Location map of the 51 modern pollen sites in the Western Ghats of South India.

According to the bioclimatic maps for the Western Ghats (Pascal, 1982), from west to east of the study area, annual rainfall decreases from >5000 mm/yr to <1200 mm/yr and dry season increases from 3 to 7 months. Temperature of the coldest month is >23°C below 650 m and <15° above 1500 m. The bioclimatic maps, drawn on the basis of both botanical and meteorological observations, provide the geographical distribution of rainfall, temperature, and dry season climatic regimes. However, they do not provide more precise data than climatic *ranges*. Mean annual precipitation, as well as mean temperature of the coldest month and humidity factor has been calculated at each pollen sites using a method that will be described in part 3.

Vegetation

The vegetation of our study area is almost entirely mapped on the Mercara-Mysore Sheet produced at scale 1:250000 by the French Institute of Pondicherry (Pascal et al., 1982). From west to east, a succession of three vegetation types is present (Fig. 2). Under high mean annual rainfall of 2000 to more than 5000 mm/yr, evergreen forests are well developed. They are present in the Ghats escarpments, but almost absent from the coastal region where human pressure is strong (Pascal, 1988; Buchy, 1996). Eastward, on the plateau, where rainfall is intermediate (1500 to 2000 mm/yr), moist deciduous forests replace evergreen forests. Further east, when rainfall is only poorly sustained by the summer monsoon, moist deciduous forests are replaced by dry deciduous formations, better adapted to low annual amount of precipitation, generally lower than 1500 mm/yr (Arora, 1965; Pascal et al., 1982; Pascal, 1988).

In the studied region, low and medium elevation evergreen forests are present. High elevation evergreen forests, not represented here as elevation does not exceed 1300 m are well developed southward in the Nilgiri hills. Low elevation evergreen forests (0 -650 m) are characterized by the abundance of tall trees such as *Dipterocarpus*, *Hopea*, *Vateria* (Dipterocarpaceae), *Kingiodendron* (Fabaceae), *Myristica*, *Knema* (Myristicaceae), *Calophyllum*, *Garcinia*, *Mesua* (Clusiaceae), *Drypetes*, *Fahrenheitia*, *Macaranga*, *Mallotus* (Euphorbiaceae), *Syzygium* (Myrtaceae), *Palaquium* (Sapotaceae), *Mangifera*, *Holigarna* (Anacardiaceae), *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae) and *Tetrameles* (Tetramelaceae). Small trees and shrubs, such as *Humboldtia* (Fabaceae), *Hydnocarpus* (Flacourtiaceae), *Aglaia* (Meliaceae), *Syzygium*, *Ixora*, *Psychotria* (Rubiaceae) and *Olea* (Oleaceae) are very common in the undergrowth. Herbaceous components are rare under these closed canopy forests, and lianas, mainly represented by *Gnetum* and *Piper*, are well developed in the natural openings or at the edges of the forest (Arora, 1964, 1965; Pascal, 1988, 1991). Low elevation evergreen forests are mapped as the type *Dipterocarpus-Kingiodendron-Humboldtia*, which is a transition between the wet evergreen and the semi-evergreen forests well developed south of 11°N and north of 13°N respectively (Pascal, 1988, 1991).

At medium elevation (650-1400 m), evergreen forests are dominated by *Cullenia* (Bombacaceae), *Palaquium* (Sapotaceae), *Mesua*, *Calophyllum* (Clusiaceae), *Aglaia* (Meliaceae), *Agrostistachys*, *Mallotus* and *Drypetes* (Euphorbiaceae). Trees of Anacardiaceae, Dipterocarpaceae (*Hopea*, *Vateria*), Elaeocarpaceae, Flacourtiaceae, Lauraceae, Myristicaceae, and Myrtaceae are also well represented. Spatial structure of these forests resembles that at low elevation, where tall trees form a closed canopy. Medium elevation evergreen forests belong to the *Cullenia-Mesua-Palaquium* type, but north of 11°55'N, *Cullenia exarillata* disappears (Arora, 1965; Pascal, 1988, 1991).

In the region of Agumbe (between 13°05'N and 13°55'N), where annual rainfall exceeds 5000 mm/yr, evergreen forests are constituted by a plant community where *Poeciloneuron indicum* is the single dominant both at low and medium elevation (between 350 and 1250 m). It accounts for 10 to 20% of the tall trees in association with other species according to altitude zoning (Arora, 1966; Pascal, 1988).

Moist deciduous forests of the Western Ghats are rich in tree species from *Buchanania* (Anacardiaceae), *Careya* (Barringtoniaceae), *Bombax* (Bombacaceae), *Terminalia* (Combretaceae), *Embllica* (Euphorbiaceae), *Cassia* (Caesalpinaceae), *Dalbergia* (Fabaceae), *Acacia*, *Albizia* (Mimosaceae), *Lagerstroemia* (Lythraceae), *Ziziphus* (Rhamnaceae), *Grewia* (Tiliaceae), *Tectona* (Verbenaceae). Poaceae, such as *Dendrocalamus*, *Cymbopogon* and the bamboo *Bambusa* are common in the under storey. Lianas are rare. The canopy, composed of deciduous trees, is loose (Arora, 1966; Pascal, 1986; Ghate et al., 1998).

Further east, dry deciduous forests are nowadays highly degraded due to over-grazing and firewood gathering. They resemble woodlands where trees of *Careya*, *Bombax*, *Anogeissus*, *Terminalia* (Combretaceae), *Bridelia*, *Embllica* (Euphorbiaceae), *Dalbergia*, *Acacia*, *Albizia*, *Grewia* and *Tectona* are very common. Among the herbaceous components, Poaceae such as *Ardisia*, *Cymbopogon*, *Dendrocalamus* and *Themeda* are abundant. Lianas are rare (Pascal, 1986; Ghate et al., 1998).

Material and methods

Pollen data

Fifty-one surface soil samples have been collected in the Mercara-Mysore region, along a west to east transect through the Western Ghats escarpments and on the Mysore plateau (Fig. 1). Sample list with details about geographic location (altitude, latitude, longitude) and vegetation (vegetation type, physiognomy, floristic type) is given in Table 1*. According to the vegetation maps (Pascal et al., 1982a, 1982b), distribution of the modern pollen samples is the following: 21 samples are from evergreen forests, 10 from secondary moist deciduous forests, and 19 from moist and dry deciduous forests and woodlands.

The sampling method of modern pollen rain that has been used consisted in collecting 20 to 30 sub-samples of surface soil, moss pollsters, and aeolian dust deposited in tree hollows, by wandering at random over an area of about 500 m. This method is similar to that applied recently for other pollen studies in South India (Bonnefille et al., 1999; Anupama et al., 2000;

* Table 1: non-reproduite ici. Se référer à l'annexe II.1 et à la table 2 présentée ci-après.

Barboni et al., submitted). The chemical treatment of the samples follows the standard method of acetolysis. Pollen counting has been carried out under optical microscope ($\times 50$ and $\times 100$).

The number of grains counted varies from 200 to 600, according to the taxa diversity recorded by the pollen spectra and evaluated during microscope analysis by drawing a curve corresponding to the number of grains counted versus the number of taxa found (Barboni et al., submitted). About 450 pollen grains have been counted for the samples from evergreen forests and 350 for those from deciduous forests. Pollen identification was based on comparison with reference slides available at the French Institute of Pondicherry, photos and descriptions in pollen atlases (Guinet, 1962; Huang, 1972; Vasanthi, 1976; Nayar, 1990; Tissot et al., 1994).

Climate data

In order to quantify the rainfall amounts associated with particular pollen taxa, the modern values of climatic parameters at each sampling site have been calculated. In the first step, mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness have been interpolated from compiled meteorological data, using a method based on Artificial Neural Network (Guiot et al., 1996; Peyron et al., 1998). In the second step, the bioclimatic variables mean annual precipitation (Pann, mm/yr), mean temperature of the coldest month (MTCO, °C) and E/PE (the ratio of actual evapotranspiration to potential evapotranspiration, %) have been calculated with the biome 1 model of Prentice et al. (1992). E/PE is a humidity factor that integrates the measure of the seasonality of precipitation and the available water-capacity of the soils (Prentice et al., 1992). It is a biologically meaningful parameter used to estimate the growth-limiting drought stress on plants (Stephenson, 1990). According to ecophysiological studies and biome simulations, E/PE is better adapted to explain the distribution of vegetation types than the length of dry season given by the Gaussen Index (Bagnouls and Gaussen, 1953).

The interpolation has been made from two meteorological datasets. The first set corresponds to mean monthly rainfall and temperature data collected by the French Institute of Pondicherry (FIP), from respectively 49 and 16 meteorological stations localized in the hilly region of the Western Ghats. These stations record temperature over 10 to 33 years, and rainfall over 29 (time period 1950 to 1979) to 79 years (1901 to 1980). The second meteorological dataset was compiled and homogenized over a period of 30 years (1960 to 1990) by (Leemans and Cramer, 1991). It provides for western South India (8° - 16° N and 74° - 78° E), the mean monthly values of temperature, rainfall and cloudiness of 22 stations. The combined use of these two data sets, which furnish climatic records over different years and periods, is necessary to calibrate the function of interpolation. FIP records, being abundant in the Western Ghats notably for precipitation data, provide a great precision on the climate of this particular region. We assume the error induced by non-homogenized FIP records lower than the error that could have been

produced by a too low number of stations. The climatic records compiled by (Leemans and Cramer, 1991) although being homogenized, are from stations located in the coastal region or on the Mysore plateau, i.e. too far away from our pollen sites to reconstruct the great climatic variability induced by the Ghats topography. Scatter plots of interpolated modern climate versus observed modern climate from the meteorological stations, are given in Fig. 3. We have obtained a good linear correlation of 0.83 between observed and estimated mean annual precipitation (Pann). The mean error of -17.5 mm establishes that the bias induced by the model is weak. Distribution of the residuals indicates that the error of interpolation ranges between of -500 to +500 mm for 60% of the interpolated Pann. The model of interpolation can thus be considered as satisfactory. However, while high amounts of precipitation are underestimated, low and medium precipitation amounts are overestimated. Extreme rainfall of >4000 mm/yr are underestimated, most probably due to the fact that only 5 meteorological stations provide such high records. The correlation coefficient obtained for E/PE (calculated only for the 14 meteorological stations that provided cloudiness plus precipitation and temperature data), is of 0.77 and is statistically significant with $P < 0.002$. Residuals between observed and interpolated E/PE range from -5% to +5% for 57% of the interpolated E/PE. The best correlation has been obtained for the mean temperature of the coldest month (MTCO) with a linear coefficient of 0.98. Residuals range between -1°C to +1°C for more than 80% of the interpolated MTCO.

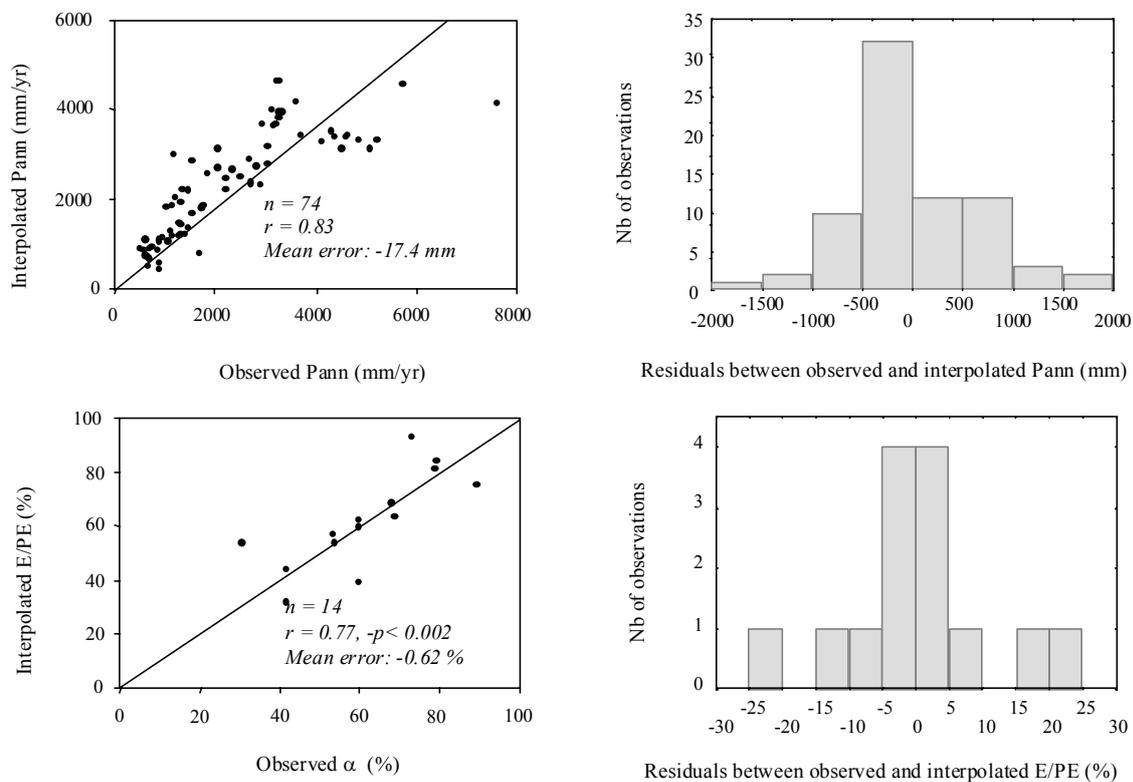


Figure 3 : Scatters plots of interpolated versus observed modern climate and distribution of the residuals.

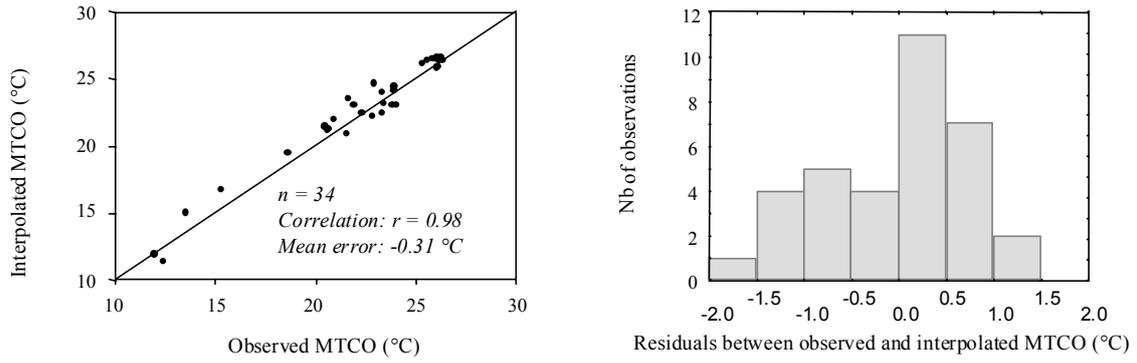


Figure 3 (continued)

Being statistically significant, the climate interpolation has been applied to the 51 modern pollen sites. Interpolated values of mean annual precipitation, temperature and humidity factor are listed in table 2.

Sample No	Pann (mm/yr)	mtco (°C)	E/PE (%)	Sample No	Pann (mm/yr)	mtco (°C)	E/PE (%)
WG57	1201	20.7	70.6	WG9	3217	21.0	71.7
WG56	1310	21.0	71.0	WG28	3224	25.9	68.1
WG55	1558	21.4	71.4	WG30	3245	25.6	67.7
WG37	1764	20.3	65.8	WG10	3273	20.8	71.8
WG44	1838	20.5	67.4	WG12	3279	21.7	71.8
WG1	1844	21.6	69.4	WG29	3375	26.0	67.8
WG2	1865	21.9	69.9	WG23	3383	20.8	67.7
WG36	1884	20.4	65.9	WG19	3396	24.5	70.2
WG43	1925	20.9	67.6	WG13	3448	21.6	70.7
WG54	1992	21.0	71.1	WG18	3459	23.4	69.3
WG3	2153	21.7	70.2	WG11	3568	21.1	71.9
WG40	2160	20.9	65.6	WG16A	3661	21.6	69.0
WG5	2162	20.3	70.7	WG16B	3661	21.6	69.0
WG42	2163	20.9	67.8	WG25B	3699	19.8	67.4
WG38	2185	19.9	66.7	WG15	3731	21.5	69.4
WG31	2203	20.7	66.3	WG17A	3772	21.4	69.0
WG41	2355	21.0	65.9	WG17B	3772	21.4	69.0
WG6	2402	21.5	70.4	WG14	4119	20.9	69.8
WG8	2459	21.5	70.6	WG24B	4383	19.9	68.7
WG7	2532	21.8	70.6	WG24A	4467	19.7	68.9
WG32	2852	18.5	68.5	WG161	4700	20.5	67.5
WG22	3057	22.6	67.6	WG160	4792	20.3	67.8
WG21	3069	24.0	68.6	WG158	5324	19.6	69.3
WG27	3087	24.8	67.0	WG159	5417	19.4	69.6
WG26	3102	21.8	65.9	WG25A	5555	19.3	69.9
WG20	3185	25.2	69.9				

Table 2: Interpolated values of mean annual precipitation (Pann, mm/yr), mean temperature of the coldest month (MTCO, °C) and humidity factor (E/PE, %) for the 51 modern pollen sites located between 11°30'N-13°20'N and 75°30'E-76°30'E in the Mercara-Mysore region, Western Ghats, South India.

All the sites exhibit a MTCO $>17.5^{\circ}\text{C}$, in agreement with the climate limits for the tropical domain (IPCC, 1995). Annual precipitation represented by the 51 pollen sites extend from 1201 to 5555 mm/yr, which fits the rainfall ranges given by the bioclimate maps (Pascal, 1982). Values for the ratio E/PE range from 65 and 72%, which indicates that although the length of dry season varies from 3 to 7 months (Pascal, 1982), rainfall meets 65 to 72% of the evaporative demand throughout the study area (Prentice et al., 1992).

Our set of modern pollen sites is adapted to investigate the plain impact of annual precipitation, in that temperature and humidity factors do not exhibit wide variations. Because MTCO remains $<15^{\circ}\text{C}$, the impact of temperature on modern pollen rain and forest floristic composition should not be significant, as evidenced by previous botanical and palynological studies from South India (Pascal, 1988; Bonnefille et al., 1999). The importance of the humidity factor E/PE on modern pollen and plant taxa distribution should not be significant as the resulting drought stress experienced by deciduous forests submitted to long dry season is equivalent to that experienced by the evergreen under short dry season.

Results

The pollen analysis of fifty-one surface soil samples from evergreen, moist deciduous and dry deciduous forests resulted in a total of 132 pollen types. Among these pollen types, 10 are aquatics (*Typha*), introduced and/or cultivated taxa (*Acacia*, *Alnus*, *Casuarina*, *Cocos*, *Eucalyptus*, *Mimosa*, *Pinus*, *Ricinus*, *Tamarindus*).

Pollen diagram

The pollen diagram presented in Fig. 4, illustrates percentages (calculated excluding aquatics, introduced, cultivated taxa, and spores) of 35 main taxa and botanical markers. Percentages of Arboreal Pollen (AP), Climber (C), Non Classified, i.e. pollen taxa which attribution to plant habit is not certain (NC) and Non Arboreal Pollen (NAP) are represented along with the synthetic diagram (ratio of AP versus NAP). Samples are arranged according to increasing values of annual precipitation, calculated as described above and listed in table 2. The pollen diagram has been subdivided into three pollen zones. They correspond to three distinct pollen associations. The first pollen zone corresponds to the samples receiving annual rainfall from 1200 to 2500 mm/yr. It is characterized by the regular occurrence of *Glochidion* pollen type, *Grewia*, *Schleichera oleosa*, *Trema orientalis*, *Lannea* type and by the abundance of *Maytenus* type, *Lagerstroemia* and Melastomataceae/Combretaceae, which may account for more than 50%. Among the herbaceous components, Poaceae are abundant and well represented in all the samples. Cyperaceae are abundant in some samples collected in deciduous forests.

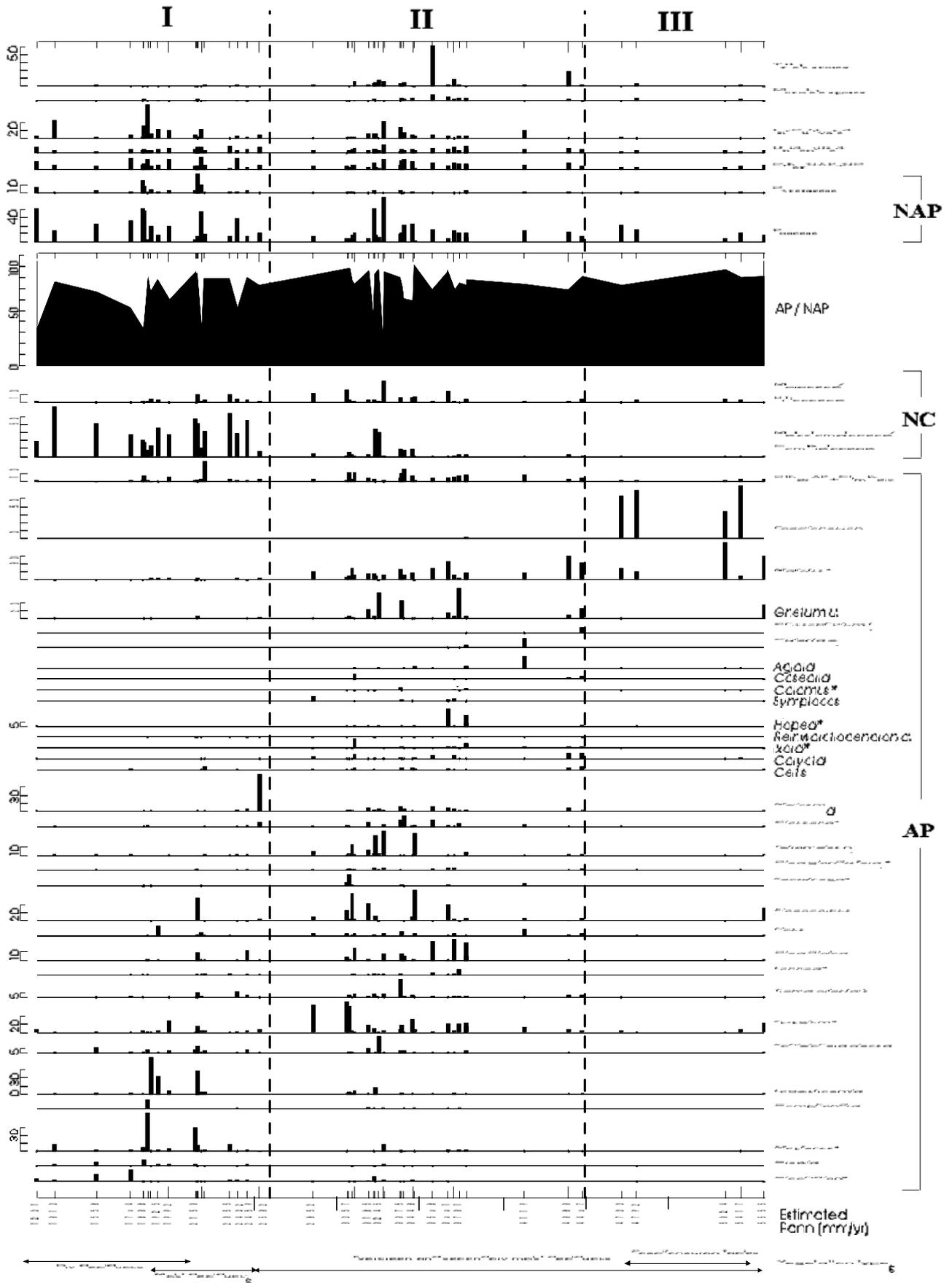


Figure 4 : Percentage pollen diagram of 51 surface soil samples collected along a west to east gradient of decreasing mean annual rainfall, in the Mercara-Mysore region, Western Ghats, South India. Pollen types are marked with *.

The second pollen zone gathers samples receiving high annual rainfall ranging from 2800 to 4500 mm/yr. This pollen zone is characterized by the abundance of many arboreal taxa such as *Syzygium* type, *Trema orientalis*, *Olea dioica*, *Elaeocarpus*, *Securinega* type, *Tetrameles nudiflora*, *Clausena* type, *Mallotus* type, Moraceae/Urticaceae and Melastomataceae/Combretaceae and the climber *Gnetum ula*. Other arboreal taxa such as *Schleichera oleosa*, *Lannea* type, *Ficus*, *Olea glandulifera* type, *Celtis*, *Caryota*, *Ixora* type, *Reinwardtiodendron*, *Hopea* type and *Calamus* type present low abundance but occur in many samples. Poaceae are still well represented, while Cyperaceae are under low percentages. These pollen taxa are associated to high percentages of spores.

The third pollen zone corresponds to the samples submitted to rainfall exceeding 4500 mm/yr. The characteristic pollen taxa are *Poeciloneuron*, with percentages of about 50% and *Mallotus* type (about 30%). In the sample under highest rainfall (5555 mm/yr), *Poeciloneuron* is absent while *Syzygium* type, *Elaeocarpus* and *Gnetum ula* are represented with significant percentages. This sample (WG25A) was collected in a disturbed *Mesua-Palaquium* forest. In all the samples from this zone, Melastomataceae/Combretaceae and Moraceae/Urticaceae are recorded under very low percentages (<5%). Percentages of Poaceae may account for 20%, while Cyperaceae are insignificant.

Numerical analysis

A correspondence analysis (CA) has been carried out on our data set of 51 samples and 124 taxa (unidentified, introduced/cultivated and aquatics excluded) to sort the pollen markers of annual precipitation. In a first step, the analysis has been carried out with all the observations, i.e. 124 pollen taxa. Because scatter plots and contributions to inertia indicated a high contribution from the pollen *Poeciloneuron*, over-represented in four samples (WG158, WG159, WG160, WG161), a second CA has been carried out excluding it. The new data matrix of 51 samples and 123 pollen taxa produced good dispersion of samples and taxa about axes 1 and 2, which all together explain 20% of the total inertia (Fig. 5a). Two groups of samples are clearly distinguished. Group I, at the negative end of axis 1 includes samples from evergreen forests and secondary formations. Group II, at the positive end of axis 1 includes samples from moist and dry deciduous forests. Axis 1, which explains 11.4% of inertia, clearly separates out forests receiving high rainfall of 2500 to 5500 mm/yr, from those receiving low rainfall of 1200 to 2500 mm/yr. Axis 2, which explains 8.6% of inertia separates among the evergreen forests. However, no particular group of samples can be distinguished to allow interpreting axis 2 as an environmental gradient.

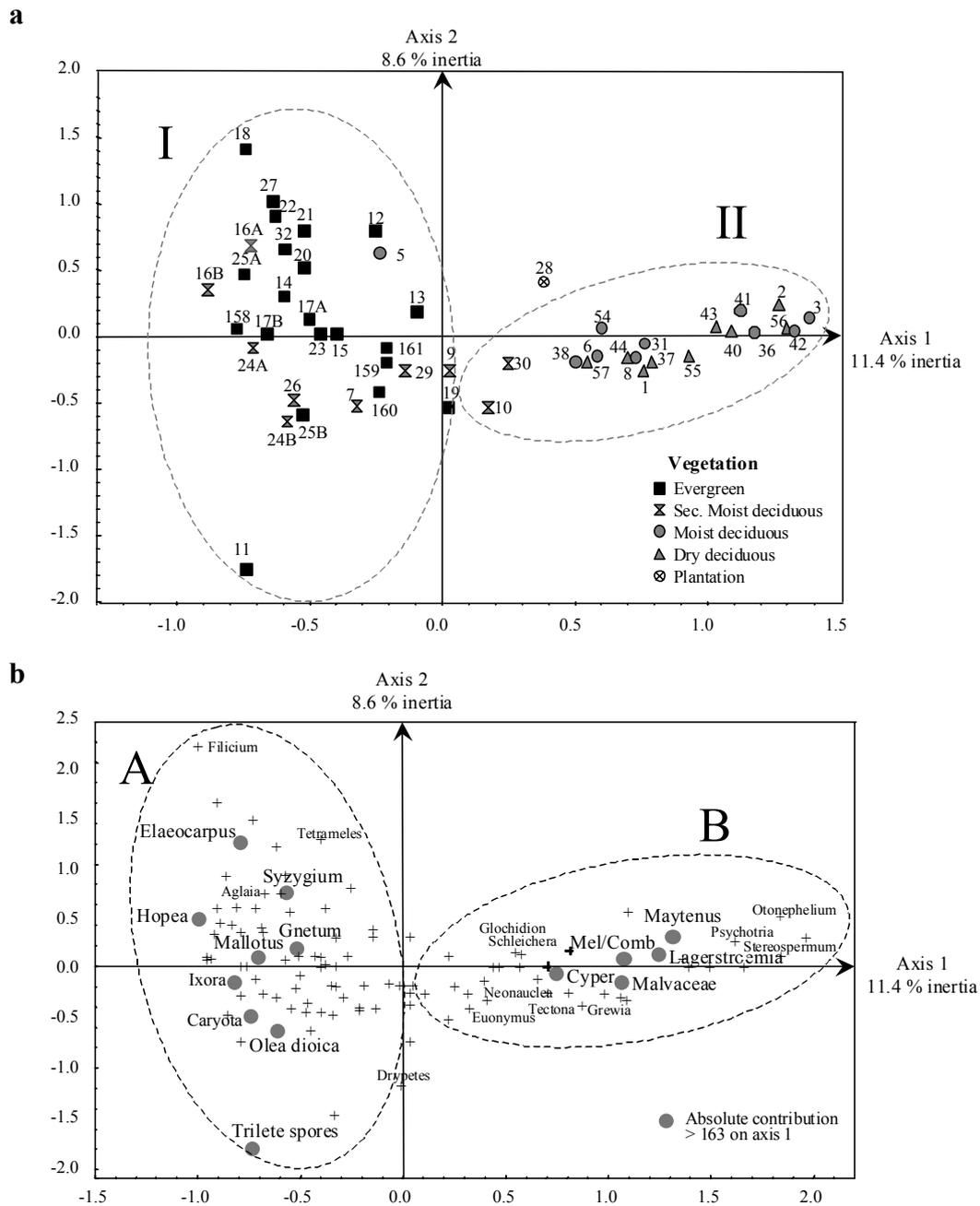


Figure 5: Dispersion of the samples (a) and pollen taxa (b) about factorial axes 1 and 2, produced by CA on raw counts corresponding to 51 samples and 123 pollen taxa (*Poeciloneuron* excluded).

We have plotted on Fig. 6a, axis 1-factorial coordinates of the 51 samples according to their corresponding interpolated value of annual precipitation (Pann, mm/yr). This figure shows that Pann decreases from negative to positive end of axis 1. The high correlation factor of 0.67 that has been obtained clearly indicates that axis 1 represents a rainfall gradient.

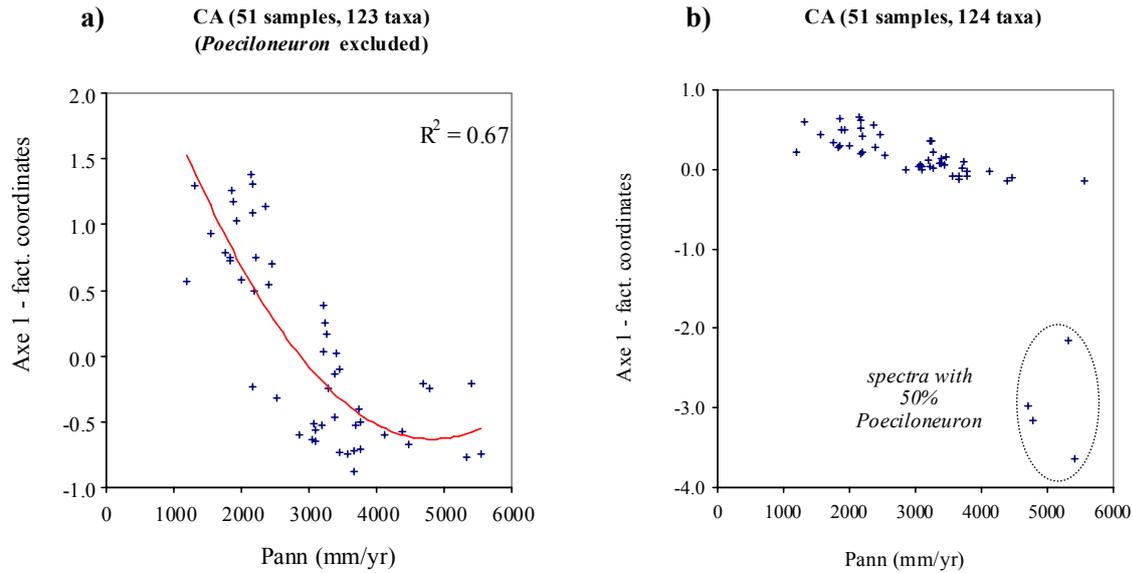


Figure 6: Axis-1 factorial coordinates of the 51 samples versus interpolated annual precipitation (Pann, mm/yr), obtained by CA, a) with 123 pollen taxa (*Poeciloneuron* excluded from the observation dataset), b) with 124 pollen as observations (*Poeciloneuron* included).

Dispersion of the pollen taxa about axes 1 and 2, as well as their contributions to inertia are given in Fig. 5b and table 3. The pollen taxa with absolute contribution to inertia greater than twice the mean ($2 \times 10000 / 123$) are considered as markers (Fenelon, 1981). Taxa having a relative contribution greater than 10% are considered as associated markers. These criteria are similar to those applied in earlier palynological studies in India (Bonnefille et al., 1999; Anupama et al., 2000; Barboni et al., submitted).

		Contributions on Axis 1			
		Taxa markers	Abs. >163	Taxa associated	Rel. >10%
I' Evergreen	<i>Mallotus*</i>		720	<i>Caryota</i>	18.2
	<i>Elaeocarpus</i>		599	<i>Ixora*</i>	11.5
	<i>Trilete spores</i>		562		
	<i>Syzygium*</i>		401		
	<i>Olea dioica</i>		253		
	<i>Gnetum ula</i>		209		
	<i>Hopea*</i>		192		
II' Deciduous	Melasto./Combr.		3160	<i>Grewia</i>	16.4
	Maytenus*		931	Malvaceae	14.0
	<i>Lagerstroemia</i>		903		
	<i>Cyperaceae</i>		242		

Table 3: Absolute and relative contributions on axis 1 of pollen taxa markers of evergreen and deciduous forests.

As shown by figure 6a, axis 1 represents a rainfall gradient. Hence, *Mallotus* type, *Elaeocarpus*, *Syzygium* type, *Olea dioica*, *Gnetum ula*, *Hopea* type and Trilete spores, which contribute strongly to define negative end of Axis 1 can be considered as markers of high annual precipitation (>2500 mm/yr). *Maytenus* type, Melastomataceae/Combretaceae, *Lagerstroemia*, Malvaceae, Cyperaceae and *Grewia*, which contribute strongly to define positive end of axis 1 are markers of low annual precipitation (1200-2500 mm/yr). These taxa, as well as the associated markers *Caryota* and *Ixora* type from group A and *Grewia* and Malvaceae from group B, are characteristic of evergreen and deciduous forests respectively. These two groups of taxa correspond well to pollen zones I and II in the pollen diagram (Fig. 4).

Discussion and conclusions

Distinction between forest types

As evidenced by the percentage pollen diagram and the correspondence analysis, pollen rain from evergreen and deciduous forests carry very distinct pollen signal. Among the evergreen forest types, the particular *Poeciloneuron* facies is clearly distinguished, while low and medium elevation evergreen forest types do not exhibit marked differences in their pollen signature.

- **Evergreen forests**

Evergreen forests are clearly identified by *Mallotus* type, *Elaeocarpus*, *Syzygium* type, *Hopea* type, *Olea dioica*, *Gnetum ula*, *Caryota* and *Ixora* (Table 3, Fig. 4). These pollen taxa, which highest percentages occur in samples from areas under rainfall >2500 mm/yr have been defined by CA as markers of evergreen forests. They represent tall trees of the canopy and small trees and shrubs from the undergrowth and reflect the floristic composition of Western Ghats evergreen forests (Pascal, 1988), described in part 2. Among them, only *Hopea* type, which includes also *Vateria* represents the Dipterocarpaceae family, although *Dipterocarpus* is the dominant canopy tree of the evergreen forests at low elevation. Despite discrepancies in the pollen representation of Dipterocarpaceae, and other dominant families, such as the Lauraceae and the Annonaceae, evergreen forests types exhibit several other pollen markers that enable their distinction, as already evidenced in other pollen studies from South India (Bonnefille et al., 1999; Barboni et al., submitted).

Pollen rain from low and medium elevation evergreen forests exhibit only few differences. Pollen spectra record under small proportion the presence of *Cullenia* and *Palaquium*, although they may account for 80% of the tall trees in evergreen forests at medium elevation (Pascal, 1988; Ganesh et al., 1996). The lack of significant differences in the pollen rain between low and medium elevation evergreen forests was expected as all the pollen sites are submitted to a

MTCO >15°C. Indeed, when MTCO becomes <15°C, that is around 1500 m of altitude, temperature becomes a limiting factor to the development of certain plant taxa such as *Gnetum ula* and *Tetrameles nudiflora*, and thus induces marked changes in the pollen rain (Bonnefille et al., 1999).

Modern pollen rain from degraded evergreen forests, mapped as secondary moist deciduous forests (Pascal et al., 1982b), is characterized by the mixed occurrence of pollen taxa characteristic of deciduous and evergreen forests. Indeed, *Schleichera oleosa*, *Glochidion* type (which represents also *Emblica*) and *Lagerstroemia* occur in all the pollen spectra from secondary forests, along with typical evergreen components. Dispersion of the samples produced by the CA evidences that disturbed evergreen forests present a pollen signature intermediate between that of true evergreen and deciduous forests (Fig. 5a). Disturbance is marked in the pollen rain by the relative abundance of taxa representing light-loving and pioneer species, which development is favored by a loosening of the canopy in evergreen forests, in agreement with previous pollen study (Barboni et al., submitted) and botanical observations (Pascal, 1986, 1988; Ghate et al., 1998).

- **Poeciloneuron facies**

The abundance of *Poeciloneuron indicum*, which represents up to 45% of the trees in the evergreen forests from the region around Agumbe (Arora, 1966; Pascal, 1988), is well marked in the modern pollen rain by high percentages of *Poeciloneuron* pollen taxa (50%). Although *Poeciloneuron* facies occur in a region submitted to extreme monsoon precipitation of >5000 mm/yr (Pascal, 1988), numerical analysis evidences that pollen signature of this facies is not to be linked with climate. Indeed, as shown in Fig. 6b, rainfall and dominance of *Poeciloneuron* taxa in the modern pollen rain are not correlated. The numerical treatment carried out on modern pollen data attests what has been suggested by botanists, who attempted to explain the particularity of such forest floristic composition, by the combined effects of soil properties (high iron and alumina contents) and *Poeciloneuron* high relative competitiveness to colonize the environment (Kadambi, 1942a, 1942b; Pascal, 1988).

- **Dry and moist deciduous forests**

Modern pollen rains of moist and dry deciduous forests are both characterized by the abundance of Melastomataceae/Combretaceae pollen taxa. Proportions of Melastomataceae/Combretaceae average 50% in the dry deciduous forests, about 40% in the moist deciduous forests, while they do not exceed 10% in evergreen forests (Fig. 7). Such high percentages convey the abundance of *Anogeissus* spp. and *Terminalia* spp. (Combretaceae), which are the main upper canopy trees in deciduous forests (Pascal, 1986). Pollen rain from

deciduous forests is also identified by the relative abundance of *Glochidion* type (most likely attributed to *Embllica officinalis*), *Grewia* and *Maytenus*, which represent well the common trees and shrubs of the *Anogeissus-Tectona-Terminalia* and *Lagerstroemia-Tectona-Dillenia* forest types (Pascal, 1986). *Lagerstroemia*, which cannot tolerate intense dryness, is recorded in the pollen rain only in moist deciduous forests, i.e. when annual rainfall is >1500-1800 mm/yr, in agreement with botanical observations (Pascal, 1986). The typical moist deciduous species, *Tectona grandis* and *Dillenia pentagyna* are rarely recorded in the pollen rain, which may be explained by the weak preservation of Verbenaceae pollen grains and/or weak pollen production. Aside from two differences, i.e. higher proportion of Melastomataceae/Combretaceae and absence of *Lagerstroemia* in the dry deciduous vegetation, pollen signatures of moist and dry deciduous forests are very close, as evidenced by the sample dispersion produced by the correspondence analysis (Fig. 5).

The pollen taxa Melastomataceae/Combretaceae, *Maytenus* type and *Lagerstroemia*, which present highest percentages in samples under rainfall of <2500 mm/yr, have been defined by CA as pollen markers of deciduous forests. Melastomataceae/Combretaceae and *Maytenus* type, along with other taxa such as *Glochidion* type, have also been defined as markers of deciduous woodlands in a previous pollen study from eastern South India (Anupama et al., 2000).

Cyperaceae pollen taxa has been defined by CA as a marker of deciduous forests in this study, while it has been defined as a marker of evergreen forests elsewhere (Bonnefille et al., 1999). Although in the study area *Killinga triceps* and *Cyperus niveusis* are commonly found in dry regions (Gamble, 1957), many other Cyperaceae are ubiquitous and develop locally in humid areas and marshy places. The environmental or climatic information carried by this taxa, being limited by the family taxonomic level of identification is thus ambiguous. Cyperaceae should not be considered as reliable markers of vegetation in further studies or interpretation of fossil pollen data.

The increased abundance of herbaceous components, which follows the loosening of the canopy as we move from evergreen to deciduous forests (Pascal, 1986, 1988; Ghate et al., 1998) is marked by the decreasing proportion of arboreal pollen. Indeed, while AP averages 70% in the evergreen forests, their proportion rarely exceeds 50% in the deciduous forests where the herbaceous and grassy undergrowth is plentiful. This fits the proportions of AP for evergreen and deciduous forests in the tropics, both from Africa (Vincens et al., 1997), South America (Rodgers III and Horn, 1996), South India and Sri Lanka (Gupta and Yadav, 1992; Chauhan, 1994; Vincens et al., 1997; Bonnefille et al., 1999; Anupama et al., 2000; Barboni et al., submitted).

Pollen signatures of evergreen and deciduous forests are also well discriminated by the relative abundance of evergreen and deciduous pollen taxa. Indeed, the proportion of pollen taxa that represents evergreen plants or plants common in evergreen forests is largely greater than 60% in evergreen forests, of about 20% in moist deciduous forests and less than 10% in dry deciduous forests, as clearly evidenced by the synthetic pollen diagram drawn in Fig. 7. Proportion of evergreen taxa in the pollen rain from secondary forests is close to that of undisturbed evergreen forests. However, when evergreen forests are degraded to woodlands or thickets, proportion of evergreen taxa may be less than 20%, in agreement with the fact that when openings are created, the shade-loving evergreen species are replaced by pioneer species including deciduous species (Ghate et al., 1998).

The three distinct pollen associations reflect the floristic composition of deciduous and evergreen forests, and the particular *Poeciloneuron* facies, although strong biases exist between pollen rain and vegetation. As already noticed in previous pollen studies, although the pollen signal emphasizes the presence of pioneer species such as *Mallotus* and do not record significantly the characteristic trees of evergreen forests, several pollen taxa can be defined as markers of the vegetation (Bonnefille et al., 1999; Anupama et al. 2000; Barboni et al., submitted).

Precipitation signal in the modern pollen rain

Correspondence analysis carried out on our pollen data has evidenced that modern pollen rain composition is closely linked ($r = 0.67$) to mean annual rainfall (Fig. 6a). In the study area, where a constant drought stress occurs (E/PE of 65-72%) although the length of dry season increases eastward from 3 to 7 months, the vegetation responds to an increasing mean annual rainfall (Pann, mm/yr) by 1) an increased evergreenness, 2) an increased tree cover density and 3) by an increased floristic diversity (Pascal, 1988, 1991; Ghate et al., 1998).

When Pann is <2500 mm/yr, vegetation is characterized by an abundance of deciduous plants (Pascal, 1986). Similarly, the modern pollen rain displays high proportions of about 80 to 90% of deciduous taxa (Fig. 7). When Pann reaches 2500 mm/yr, deciduous forests are replaced by evergreen forests. The pollen rain shows similarly an abrupt increase in the proportion of evergreen taxa which passes from <20% to >80% (Fig. 7). Table 4 shows that the proportion of evergreen taxa is highly positively correlated with Pann ($+0.85$, $P < 0.01$). When mean annual rainfall increases, the percentage of evergreen taxa represented in the pollen rain increases. In turn, the proportion of deciduous taxa decreases. Pann is better correlated with the proportion of evergreen taxa than with the proportion of deciduous taxa (-0.60 , $P < 0.01$), in that the abundance of deciduous taxa is also function of the disturbance level of a forest as discussed above (Ghate et al., 1998).

Increased tree density harbored by the forests from the high rainfall zones of the Western Ghats is marked in the pollen rain by an increased proportion of arboreal pollen (AP). As shown in Table 4, the proportion of AP is highly positively correlated with the proportion of evergreen taxa (+0.80, $P < 0.01$) and with Pann (+0.85, $P < 0.01$), which reflects well the fact that highest tree densities occur in evergreen forests from the highest rainfall zones (Pascal, 1988; Ghate et al., 1998).

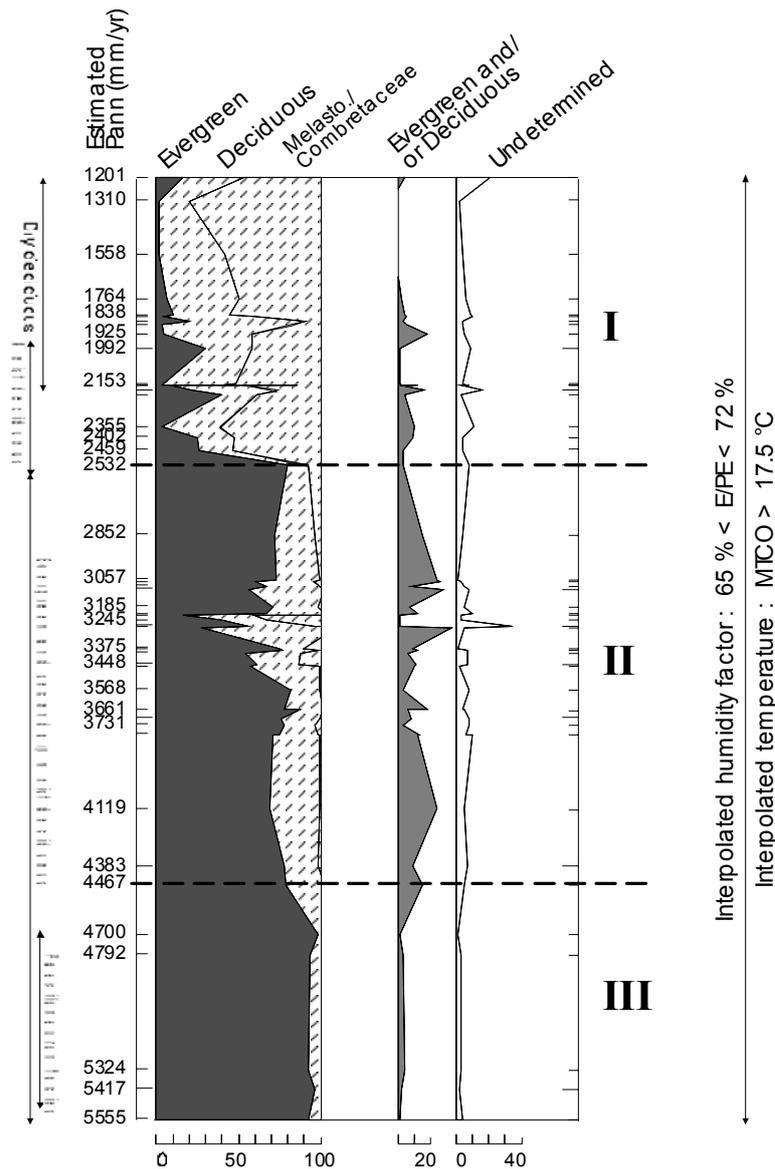


Figure 7: Synthetic pollen diagram for ecological groups of taxa. The evergreen/(deciduous) group represents the taxa or pollen types including evergreen/(deciduous) plants or plants common in evergreen/(deciduous) forests. The groups represent ever trees, shrubs and climbers, as well as NC pollen taxa when information concerning phenology was known. Herbs (NAP) are not included in any groups. The group "Evergreen and/or Deciduous" includes taxa and pollen types representing both evergreen and deciduous plants. "Undetermined" represents AP and NC taxa for which phenology or ecology could not be determined.

Increased floristic diversity occurring in the Western Ghats evergreen forests, is recorded in the pollen rain by an increased number of pollen taxa (Σ taxa, Table 1). Table 4 shows that increasing evergreenness recorded in the pollen rain corresponds to increased diversity of the pollen spectra (+0.43, $P < 0.01$). However, it should be noted that Pann and pollen spectra diversity are not directly correlated. Taxa diversity is also highly positively correlated with the proportion of AP (+0.39, $P < 0.01$), which may be an artifact due to the fact that many herbaceous taxa are not identified beyond the family level, such as the Poaceae and Compositae, or worst beyond a pollen type which clusters two families (e.g. Chenopodiaceae/ Amaranthaceae). This result may also indicate that our knowledge of non-arboreal pollen taxa (NAP) need to be improved to properly estimate the biodiversity of a vegetation through the taxa diversity of its corresponding pollen signature (Barboni et al., 1999).

	PANN	MTCO	E_PE	Porportion of evergreen taxa	Porportion of deciduous taxa	Porportion of AP	Σ Taxa
PANN		-0.09	0.06	0.85	-0.60	0.73	0.25
MTCO			-0.01	-0.06	0.17	0.15	0.12
E_PE				0.14	-0.15	-0.02	-0.02
Porportion of evergreen taxa					-0.77	0.80	0.43
Porportion of deciduous taxa						-0.37	-0.39
Porportion of AP							0.39
Σ Taxa							

Table 4: Correlation between the climatic parameters Pann (mean annual precipitation), MTCO (mean temperature of the coldest month), humidity factor (E/PE) and various attributes of pollen spectra. Values significant at $P < 0.01$ are printed in bold type. Critical values of $r(df=51)$: 0.36 ($P < 0.01$).

As expected, the humidity factor E/PE, which ranges from 65 to 72%, has no influence on the pollen taxa distribution, neither has MTCO which remains $>15^{\circ}\text{C}$, when Pann increases from 1200 to >5000 mm/yr, as evidenced by CA. A recent pollen study has shown that when mean annual rainfall is greater than 2000 mm/yr, the seasonality of precipitation (expressed here by the humidity factor E/PE rather than by a number of dry months) discriminates within the type evergreen, three distinct pollen signatures which characterize well the Western Ghats wet evergreen, evergreen and semi-evergreen forests (Barboni et al., submitted). Here, our results evidence that when mean annual rainfall is lower than 2500 mm/yr, the seasonality of precipitation has no influence on the proportion of evergreen or deciduous taxa (r not significant). Mean annual precipitation is most likely the limiting factor to the development of evergreen forests rather than the drought stress induced by too long dry season, in agreement with botanical observations (Pascal, 1988, 1991).

To conclude, the signal of precipitation in the modern pollen rain from the tropical forests of South India, is clearly marked by distinct pollen associations that characterize well the distinct evergreen and deciduous forest types. Numerical analysis has evidenced that modern pollen rain composition is closely linked to annual amounts of precipitation and that pollen taxa such as *Mallotus* type, *Elaeocarpus*, *Syzygium* type, *Gnetum ula*, *Hopea* type, *Olea dioica* and Melastomataceae/Combretaceae, *Lagerstroemia* and *Maytenus* type are climatically sensitive taxa that should allow quantitative pollen-derived precipitation estimates. However, it must be taken into account that the climatic domain studied here is not representative of a wide range of environmental variables and that it is therefore necessary to enlarge the dataset of modern pollen spectra to other regions where temperature and drought stress conditions are different. It is interesting to note that these pollen taxa have been recorded in modern and fossil pollen spectra from South East Asia (Van der Kaars, 1991; Van der Kaars and Dam, 1995) and northeastern Australia (Crowley et al., 1994; Kershaw, 1994; Kershaw and Bulman, 1994; Moss and Kershaw, 2000; Van der kaars et al., 2000), and that along with others they provided precipitation estimates (Kershaw and Nix, 1988).

The modern pollen rain from Western Ghats tropical evergreen and deciduous forests records the increased abundance of evergreen plants, as well as the increased tree density and floristic diversity, which follows an increased mean annual precipitation.

Acknowledgments

We would like to acknowledge the French Ministry of Foreign Affairs which provided grants through the French Institute of Pondicherry (FIP), and Indian authorities from the Forests departments of Kerala and Karnataka which provided authorizations to collect samples and fieldwork facilities. At FIP, our best thanks are due to S. Sabaraj and S. Prasad for technical assistance. We thank J. Guiot for its useful comments provided during the climate data interpolation.

References

- Anupama, K., Ramesh, B.R. and Bonnefille, R., 2000. Modern pollen rain from the Biligirirangan-Melagiri hills of southern Eastern Ghats, India. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 108: 175-196.
- Arora, R.K., 1964. The Botany of Coorg Forests, II. *Proceedings of National Academy of Sciences, India*, 34B: 100-112.
- Arora, R.K., 1965. Ecological notes on the Coorg District, Western Ghats. *Indian Forester*, 91: 722-742.
- Arora, R.K., 1966. The vegetation of South Kanara District, Western Ghats, India. III. Evergreen Type. *Journal of the Indian Botanical Society*, 45: 304-316.
- Bagnouls, F. and Gaussen, H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Document pour les cartes des productions végétales, 1, Toulouse, 47 pp.
- Barboni, D., Bonnefille, R., Gimaret, C. and Chuine, I., 1999. Biodiversity - Methodological aspects, XV INQUA Congress, Durban, South Africa.
- Barboni, D., Bonnefille, R., Prasad, S. and Ramesh, B.R., submitted. Modern pollen rain from tropical forests related to seasonal monsoon climate, southwest India. *Journal of Vegetation Science*.
- Bonnefille, R. et al., 1999. Modern pollen spectra from tropical South India and Sri Lanka, altitudinal distribution. *Journal of Biogeography*, 26(6): 1255-1280.
- Chauhan, M.S., 1994. Modern pollen/vegetation relationship in the topical deciduous Sal (*Shorea robusta*) forests in District Sidhi, Madhya Pradesh. *Journal of Palynology*, 30: 165-175.
- Crowley, G.M., Grindrod, J. and Kershaw, A.P., 1994. Modern pollen deposition in tropical lowlands of northeast Queensland, Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 83: 299-327.
- Gadgil, S. and Joshi, N., 1983. Climatic clusters of the Indian region. *Journal of Climatology*, 3: 47-63.
- Gamble, J.S., 1957. *Flora of the Presidency of Madras (1916-1935)*, London.
- Ganesh, T., Ganesan, M., Devy, S., Davidar, P. and Bawa, K.S., 1996. Assessment of plant biodiversity at a mid-elevation evergreen forest of Kalakad-Mundanthurai Tiger Reserve, Western Ghats, India. *Current Science*, 71(5): 379-391.
- Ghate, U., Joshi, N.V. and Gadgil, M., 1998. On the patterns of tree diversity in the Western Ghats of India. *Current Science*, 75(6): 594-603.
- Guinet, P., 1962. *Pollens d'Asie tropicale*. Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry, 8, 52 pl pp.
- Guiot, J., Cheddadi, R., Prentice, I.C. and Jolly, D., 1996. A method of biome and land surface mapping from pollen data: Application to Europe 6000 years ago. *Palaeoclimates*, 1: 311-324.
- Gunnell, Y., 1997. Relief and climate in South Asia: the influence of the Western Ghats on the current climate pattern of Peninsular India. *International Journal of Climatology*, 17: 1169-1182.
- Gupta, H.P. and Yadav, R.R., 1992. Interplay between pollen rain and vegetation of Tarai-Bhabar in Kumaon Division, U. P., India. *Geophytology*, 21: 183-189.
- Huang, T.C., 1972. *Pollen flora of Taiwan*. National Taiwan Univ., Botany Dept. Press., Taiwan, 297 p. pp.
- Kadambi, K., 1942a. The evergreen ghat rain forests of the Tunga and the Bhadra river sources. (Part I). *Indian Forester*, 68(5): 233-240.
- Kadambi, K., 1942b. The evergreen ghat rain forests of the Tunga and the Bhadra river sources. (Part II). *Indian Forester*, 68(6): 305-312.

- Kershaw, A.P., 1994. Pleistocene vegetation of the humid tropics of northeastern Queensland, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: 399-412.
- Kershaw, A.P. and Bulman, D., 1994. The relationship between modern pollen samples and environment in the humid tropics region of northeastern Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 83: 83-96.
- Kershaw, A.P. and Nix, H.A., 1988. Quantitative palaeoclimatic estimates from pollen data using bioclimatic profiles of extant taxa. *Journal of Biogeography*, 15: 589-602.
- Leemans, R. and Cramer, W., 1991. The IIASA Climate database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid., International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg.
- Moss, P.T., and Kershaw, A.P., 2000. The last glacial cycle from the humid tropics of northeastern Australia: comparison of a terrestrial and a marine record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155: 155-176.
- Nayar, T.S., 1990. Pollen flora of Maharashtra State, India. Today & Tomorrow's Printer and Publishers, Delhi, 150 pp.
- Pascal, J.-P., 1982. Bioclimates of the Western Ghats. Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech.
- Pascal, J.-P., 1986. Explanatory booklet on the forest map of South India., hors série 18. Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech., 88 pp.
- Pascal, J.-P., 1988. Wet evergreen forests of the Western Ghats of India., 20 bis. Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech., 345 pp.
- Pascal, J.-P., 1991. Floristic composition and distribution of evergreen forests in the Western Ghats, India. *Palaeobotanist*, 39(1): 110-126.
- Pascal, J.P., Shyam Sunder, V. and Meher-Homji, V.M., 1982a. Forest map of South India - Sheet: Shimoga. Karnataka and Kerala Forests Departments and the French Institute of Pondicherry.
- Pascal, J.-P., Shyam Sunder, V. and Meher-Homji, V.M., 1982b. Forest map of South India - sheet: Mercara/Mysore. Karnataka and Kerala Forest Departments and the French Institute of Pondicherry.
- Peyron, O. et al., 1998. Climatic reconstruction in Europe for 18,000 YR B.P. from Pollen Data. *Quaternary Research*, 49: 183-196.
- Prentice, I.C. et al., 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19: 117-134.
- Rodgers III, J.C. and Horn, S.P., 1996. Modern pollen spectra from Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 124: 53-71.
- Singh, N., 1986. On the duration of the rainy season over different parts of India. *Theoretical Applied Climatology*, 37: 51-62.
- Stephenson, N.L., 1990. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *Am. Nat.*, 135: 649-670.
- Tissot, C., Chikhi, H. and Nayar, T.S., 1994. Pollen of wet evergreen forests of the Western Ghats, India. Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry, 35, 133 p. pp.
- van der Kaars, W.A., 1991. Palynology of eastern Indonesian marine piston-cores: A Late Quaternary vegetational and climatic record for Australasia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 85: 239-302.
- van der Kaars, W.A. and Dam, M.A.C., 1995. A 135,000-year record of vegetational and climatic change from the Bandung area, West-Java, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 117: 55-72.
- van der Kaars, Wang, X., Kershaw, P., Guichard, F. and Setiabudi, D.A., 2000. A Late Quaternary palaeological record from the Banda Sea, Indonesia: patterns of vegetation, climate

and biomass burning in Indonesia and northern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155: 135-153.

Vasanthi, G., 1976. Pollens des montagnes du Sud de l'Inde (Pollen of South Indian hills). Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry, 74, 15pl. pp.

Vincens, A., Ssemmanda, I., Roux, M. and Jolly, D., 1997. Study of the modern pollen rain in Western Uganda with a numerical approach. *Revue of Paleobotany and Palynology*, 96: 145-168.

Résumé de l'article

Nous avons analysé le contenu pollinique de 51 échantillons de surface de sol, collectés dans les forêts tropicales sempervirentes et décidues des Ghâts occidentaux de l'Inde du Sud, le long d'un gradient ouest-est de pluviométrie décroissante (entre 11°30'N-13°20'N et 75°30'E-76°30'E). Les valeurs de précipitation moyenne annuelle (PANN, mm/an) ont été calculées pour chacun des 51 sites échantillonnés, à partir d'un grand nombre de données de stations météorologiques en Inde du Sud à l'aide d'une méthode d'interpolation spatiale basée sur l'utilisation de Réseaux Neuronaux Artificiels. Les valeurs interpolées de PANN sont comprises entre 1200 et 5555 mm/an, tandis que les valeurs moyennes de la température du mois le plus froid (MTCO) et du coefficient d'humidité (E/PE, le rapport entre l'évaporation réelle et l'évaporation potentielle), aussi interpolées à chacun des sites, restent constantes : MTCO >15°C et 65% < E/PE < 72%.

Les résultats, présentés sous la forme de diagrammes polliniques où les échantillons sont arrangés en fonction d'une pluviométrie croissante, indiquent que le signal climatique des précipitations est bien mis en évidence dans la pluie pollinique actuelle des forêts tropicales, par des associations polliniques distinctes. Les analyses numériques montrent que la pluviométrie annuelle est le facteur climatique majeur expliquant la distribution actuelle des taxons polliniques dans la région. Les taxons polliniques marqueurs d'une forte pluviométrie (PANN > 2500 mm/an) sont *Mallotus*, *Elaeocarpus*, *Syzygium*, *Olea dioica*, *Gnetum ula* et *Hopea*, associés à *Ixora* et *Caryota*. Les taxons marqueurs d'une faible pluviométrie (PANN < 2500 mm/an) sont les Melastomataceae/Combretaceae, *Maytenus*, *Lagerstroemia* et *Grewia*.

Les spectres polliniques reflètent bien l'impact d'une pluviométrie croissante dans la végétation. En effet, quand la pluviométrie est < 2500 mm/an, le pourcentage des taxons arborés (AP) est < 50% et la proportion des taxons représentant des plantes sempervirentes est < 20%. Quand la pluviométrie dépasse 2500 mm/an, la proportion des AP est de 70% en moyenne et celle des taxons sempervirents de 60% (jusqu'à 90%). La pluie pollinique actuelle traduit bien l'augmentation des sempervirents et de la densité d'arbres, lorsque la pluviométrie augmente. La forte corrélation entre la pluviométrie et la proportion de taxons polliniques sempervirents conduit à penser que la pluviométrie est un paramètre climatique qui pourrait être valablement estimé à partir des données polliniques des végétations tropicales de l'Inde du Sud.

1.3. Pluie pollinique actuelle et longueur de la saison sèche

On se propose d'analyser ici la pluie pollinique actuelle des forêts sempervirentes en mettant l'accent sur l'effet de la longueur de la saison sèche.

Quelle est la variable qui permet le mieux d'appréhender la saisonnalité des précipitations ? Le problème est que la longueur de la saison sèche peut être définie de plusieurs façons :

1. Selon l'index de Gaussen, un mois est considéré comme sec lorsque le montant des précipitations mensuelles est inférieur à 2 fois la température moyenne mensuelle, soit $P < 2T$ (Bagnouls and Gaussen, 1953).
2. La communauté internationale a préféré considérer qu'un mois est sec lorsque le montant des précipitations mensuel est inférieur à une valeur seuil choisie à 50 mm/mois. Cependant, cette valeur étant toujours largement supérieure à 50 mm/mois due aux fortes précipitations de mousson, seulement deux régions climatiques sont déterminées pour l'Inde. Une saison sèche définie par $P < 50$ mm/mois n'est donc pas adaptée ici.
3. Dans les modèles de type BIOME, qui prédisent la distribution des types de végétations en fonction de contraintes climatiques à l'échelle globale, c'est le coefficient d'humidité E/PE qui a été préféré pour représenter la saisonnalité des précipitations. Ce coefficient, qui est calculé en considérant les montants de précipitations journaliers et la capacité de rétention en eau des sols intègre la saisonnalité des précipitations et représente un paramètre climatique auquel les plantes sont sensibles.

Dans l'étude présentée ici, nous avons choisi de considérer l'index de Gaussen (Bagnouls and Gaussen, 1953), pour utiliser le même paramètre que les botanistes qui ont montré que d'importants changements de composition floristique interviennent au sein même des végétations sempervirentes, lorsque la longueur de la saison sèche passe de 2 à 7 mois (Pascal, 1988).

Pour mettre en évidence l'impact de la longueur de la saison sèche sur la composition de la pluie pollinique actuelle, nous avons sélectionné dans le dataset initial les sites polliniques soumis à des conditions où $MTCO > 20^{\circ}\text{C}$ et les précipitations annuelles sont > 2000 mm/an.

Questions

- Le signal pollinique traduit-il les différences de composition floristique existant entre les forêts sempervirentes humides, sempervirentes et semi-sempervirentes ?
- Dans le but de quantifier les changements de saisonnalité de la mousson qui seraient survenus dans le passé, quels sont les taxons polliniques marqueurs de la longueur de la saison sèche pour ces formations tropicales ?

Les réponses à ces questions sont présentées sous la forme d'un article par Barboni, D., Bonnefille, R., Prasad, S. et Ramesh, B.R., « Modern pollen rain from evergreen tropical forests of Southwest India related to monsoon climate », soumis à Journal of Vegetation Science.

- **Article à Journal of Vegetation Science (soumis)**

Modern pollen rain from tropical forests related to monsoon climate in Southwest India

D. Barboni^{1*}, R. Bonnefille, S. Prasad¹ and B.R. Ramesh¹

¹*French Institute of Pondicherry, 11, Saint Louis Street, B.P.33, Pondicherry –605001 India*

²*C.E.R.E.G.E., Europôle Méditerranéen de l'Arbois, B.P.80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4, France*

Abstract

We analyzed pollen content of 71 surface soil samples from wet evergreen, evergreen, and semi-evergreen forests in the Western Ghats of South India, between 8°48'N and 15°08'N. Pollen sites sample forests at low and medium elevation (< 1000 m), under humid (2000 to 5000 mm/yr of precipitation) and warm (mean temperature of the coldest month, MTCO > 16°C) conditions. The region is under influence of seasonal distribution of monsoon rain, following a south to north gradient of increasing dry season.

Percentage pollen diagram and correspondence analysis show that distinct pollen associations and markers characterize evergreen and semi-evergreen forests. Abundance of Melastomataceae/Combretaceae, associated with *Aporosa*, *Schleichera oleosa* and *Syzygium* distinguish semi-evergreen forests under long dry season (5 to 7 months). Wet evergreen forests under short dry season (2 to 5 months) are characterized by *Ficus*, *Elaeocarpus*, *Mallotus*, and *Tetrameles nudiflora*. High percentages of Melastomataceae/Combretaceae with *Mallotus* and *Tetrameles nudiflora* characterize low elevation forests where MTCO >23°C, while *Syzygium*, *Olea dioica* indicate medium elevation forests, where MTCO ranges from 16° to 23°C.

In agreement with abundant tree cover, proportion of Arboreal Pollen (AP) remains high in all types of forests and constant whatever the length of dry season. Pollen spectra with high proportion of climbers (*Gnetum ula*) characterize evergreen forests with open canopy.

Key words: Pollen markers, numerical analysis, evergreen forest, dry season, Western Ghats.

Introduction

The study of modern pollen rain is to understand the pollen response of a vegetation, given the biases induced by variation in pollen production, dispersion, preservation, expansion strategies of plants and most of all, given the climatic conditions to which are subjected the plants of a particular area.

Pollen response to temperature and mean annual rainfall is already documented for tropical and temperate vegetation of Africa (Roeland et al., 1988; Chalié et al., 1990; Bonnefille et al., 1990; Chalié, 1992; Vincens et al., 1994), America (Howe & Webb, 1983; Prentice et al., 1991; Webb et al., 1993) and Europe (Guiot et al., 1996; Cheddadi et al., 1997). In South India and Sri Lanka, recent study has evidenced the impact of a 15°C mean temperature of the coldest month on modern pollen rain, on tropical evergreen and deciduous vegetation according to altitude gradient (Bonnefille et al., in press). Other pollen data document drier evergreen and deciduous vegetation from the Eastern Ghats hills of south India, in relation with mean annual rainfall (Anupama et al., 2000).

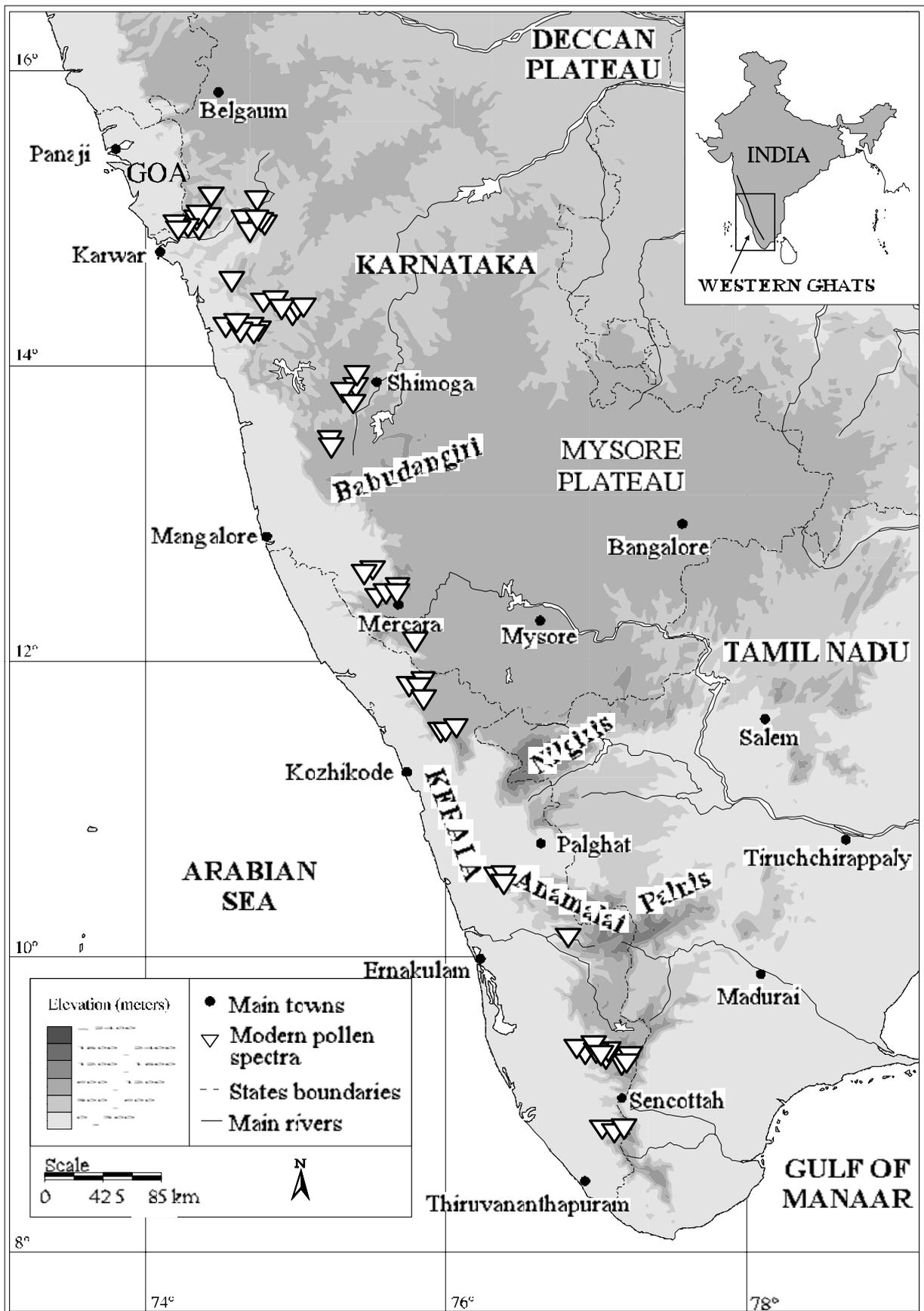
Here we present the results of an additional study on modern pollen rain from South India. It concerns evergreen vegetation located in the Western Ghats, which are submitted to heavy seasonal monsoon rains. We collected surface pollen samples on a wide geographical area to obtain a good knowledge of pollen distribution at a regional scale. The purpose of this research is to analyze modern pollen rain in surface soil samples from vegetation under monsoon climate, focussing on the effect of the lengthening of dry season. This study aims to isolate how various climatic thresholds are reflected in modern pollen rain from evergreen vegetation.

Environmental settings

The studied area is located in South India and corresponds to the coast-restricted chain of hills called Western Ghats (figure 1). This narrow mountainous strip extends over a length of 1600 km from 8°10'N to 20°N along the western coast. Elevation varies from south to north and averages 1800 m in the south up to 14°N and 600 m between 14° and 16°N.

Climate

Climate of the Western Ghats is characterized by an unimodal rainfall pattern; a period of heavy precipitation alternates with a dry season. Rains are brought by the south-west monsoon winds which strike against this natural barrier. The southern Western Ghats mountains, with peaks at *ca.* 2600 m, trigger heavy precipitation by providing excess atmospheric turbulence



French Institute of Pondicherry - Geomatics Lab.

Figure 1: Location map of the 71 modern pollen sampling sites in the Western Ghats of South India.

(Ramachandran & Banerjee, 1983). They also stop the inland penetration of southwestern monsoon rains beyond 90 km from the coast and create from 10° to 22°N, a rain-shadow on the Deccan, which is semi-arid (Gadgil & Joshi, 1983; Singh, 1986; Gunnell, 1997). Vegetation changes in the Western Ghats are determined by three climatic gradients (Pascal, 1982c).

One climatic gradient corresponds to the decreasing west to east mean temperature of the coldest month (MTCO), according to increasing altitude. MTCO is greater than 23°C below 650 m and lesser than 15°C above 1500 m (figure 2a)¹.

The second climatic gradient represents the decreasing west to east mean annual rainfall. Heavy rainfall (2000 mm up to >5000 mm/yr) from May to July characterizes the coastal region and the Western Ghats barrier itself. Moderate (1200 to 2000 mm/yr) and low (<600-900 mm/yr) rainfall characterize the semi-arid plateaus of Deccan and Mysore under the Ghats rain-shadow (figure 2b)¹.

The third climatic gradient corresponds to dry season. A dry season defined as a sequence of consecutive months where rainfall is lesser than 50 mm is not adapted to India, in that it results in only two dry season categories for the Western Ghats, unsurprisingly heavy weighted by the summer monsoon months (Singh, 1986, cited in Gunnell, 1997). Pascal (1982c) used the Gausson index, where a dry month occurs when rainfall is lesser than twice mean monthly temperature (Bagnouls & Gausson, 1953). This index resulting in a higher number of dry season categories is better adapted to explain vegetation changes that occur from south to north in the Western Ghats. Thus, following Gausson index, on the leeward slope of the Ghats exposed to summer monsoon, dry season increases from south to north according to arrival-withdrawal of the monsoon. It lasts 4-5 months at 11°N, 5-6 months at 13°30'N and exceeds 6 months above 14°N (figure 2c)¹. Dry season also increases from west to east, differently at each latitudinal transect, according to inland penetration of monsoon rain.

Vegetation

The extreme variety of climate types induces a characteristic and complex distribution of vegetation in South India. Geographical repartition of these vegetation types is given by detailed maps produced at 1:250000 scale (Pascal, 1982a, 1982b, 1984; Ramesh et al., 1998). In the Western Ghats, where rainfall exceeds 2000 mm/yr, it's the domain of evergreen forests. From 8° to 16°N, several floristic types have been distinguished under the categories wet evergreen,

evergreen and semi-evergreen forests, according to the length of dry season. They have been distinguished also according to altitude, under the categories low, medium and high elevation forests, as illustrated in figure 3² (Pascal, 1991). We summarize below, the structure and floristic composition of wet evergreen, evergreen and semi-evergreen forests at low and medium elevation which have been sampled for modern pollen rain.

Wet evergreen and evergreen forests

Wet evergreen and evergreen forests of low and medium elevation are characterized by tall trees (25-30 m in height), compact canopy of evergreen components and lianas (i.e. woody climbers) that attain gigantic growth. Dense evergreen undergrowth is almost devoid of herbaceous components but rich in thorny species (Arora, 1966a; Pascal, 1986; Ghate et al., 1998).

At low elevation, wet evergreen and evergreen forests are characterized by the abundance of Dipterocarpaceae (*Hopea*, *Dipterocarpus*, *Vateria*). In the canopy Elaeocarpaceae (*Elaeocarpus*), Caesalpiniaceae (*Humboldtia*, *Kingiodendron*), Myristicaceae (*Myristica*, *Knema*), Euphorbiaceae (*Agrostistachys*, *Aporosa*, *Drypetes*, *Fahrenheitia*, *Macaranga*, *Mallotus*) and Myrtaceae (*Syzygium*, *Eugenia*) are also well represented. In the undergrowth, Rubiaceae (*Psychotria*, *Saprosma*, *Lasianthus*), Rutaceae (*Clausena*, *Toddalia*, *Vepris*), Celastraceae and Melastomataceae are abundant (Pascal, 1986, 1988, 1991). Wet evergreen forests are distinguished from the evergreen ones by the abundance of *Strombosia ceylanica* and the endemic *Anacolosa densiflora* (Olacaceae) (Ramesh et al, 1998).

In medium elevation evergreen forests from south to north, Elaeocarpaceae, Myristicaceae, Myrtaceae, Lauraceae, Flacourtiaceae, Staphyleaceae, Sapindaceae (*Turpinia*), Anacardiaceae, Symplocaceae and Dipterocarpaceae (*Hopea*) are common families. From 8°20' to 11°55'N, Bombacaceae (*Cullenia* uniquely), Sapotaceae (particularly *Palaquium*), Clusiaceae (*Mesua*, *Calophyllum*), Meliaceae (*Aglaia*) and Euphorbiaceae (*Agrostistachys*, *Mallotus*, *Drypetes*) dominate. There is a botanical limit at 11°55'N marked by the disappearance of *Cullenia*, while species of the four other families remain preponderant (Pascal, 1991).

In the coastal region where human pressure is high, wet evergreen and evergreen forests are extensively degraded. Mapped as secondary moist deciduous formations (Pascal, 1986), they present a structure characterized by tall trees (10-20 m in height) and close, but not dense canopy of deciduous trees, among which *Albizia odoratissima*, *Cassia fistula*, *Careya arborea*,

¹ Figure 2 : voir Figure I.5 dans le chapitre I.

² Figure 3: voir Figure I.6 dans le chapitre I.

Embllica officinalis, *Lagerstroemia microcarpa*, *Terminalia* spp., *Schleichera oleosa* and *Xylia xylocarpa* are common. These forests contain 0 to 40% of evergreen trees, among which *Aporosa lindleyana*, *Olea dioica*, and *Flacourtia montana* are well represented. Climbers are common and undergrowth is occasionally invaded by weeds such as *Eupatorium* and *Lantana*, with many herbaceous and thorny species (Pascal, 1986; Ghate et al., 1998).

Semi-evergreen forests

Semi-evergreen forests of the Western Ghats are characterized by a mixture of moderately tall (15-20 m in height) evergreen and deciduous trees (40 to 80% of evergreen trees). The canopy is closed but loose and the under storey is very rich in lianas and climbers. The undergrowth is evergreen with common herbaceous components (Arora, 1966b; Ghate et al., 1998). These forests, dominated by Ebenaceae (*Diospyros*) and *Xylia xylocarpa* (Mimosaceae), are a combination of heliophilous representative of the evergreen vegetation (*Antidesma menasu*, *Aporosa lindleyana*, *Artocarpus hirsutus*, *Carallia brachiata*, *Holigarna arnottiana*, *Hopea ponga*, *Macaranga peltata*, *Mallotus* spp., *Olea dioica*, *Syzygium cumini*) and deciduous species common in the disturbed forests (*Lagerstroemia microcarpa*, *Terminalia* spp., *Albizia odoratissima*, *Dillenia pentagyna*, *Schleichera oleosa*, *Sterculia* spp., *Tetrameles nudiflora*, *Grewia tiliaefolia*). In the under storey, *Ixora brachiata*, *Memecylon talbotianum*, *Aporosa lindleyana* and *Leea indica* are abundant (Arora, 1963, 1966b; Pascal, 1986).

Material and Method

Method of sampling and location of the samples

The sampling method of modern pollen rain that we applied consists of collecting 20 to 30 sub-samples of surface soil, moss pollsters, and aeolian dust deposited in tree hollows, by wandering at random in an area of about 500 m . This method, applied to Africa (Bonnefille et al., 1993) and India (Bonnefille et al., 1999; Anupama et al., 2000) proved to be appropriate to study modern pollen rain in tropical regions (Jolly et al., 1996).

We have done surface soil sampling in an area that covers almost 7° of latitude, corresponding to vegetation and climate at a regional scale. Forests were easily located using the vegetation maps produced by the French Institute of Pondicherry (Pascal, 1982a, 1982b, 1984; Ramesh et al., 1998). Sampling strategy was based on the climatic gradients discussed previously (figure 2). To study the influence of the length of dry season on pollen taxa

distribution, it was important to choose the sampling sites on the bioclimate and vegetation maps as to minimize the effects of other parameters such as temperature and rainfall.

In this study, we have limited the sampling to areas where MTCO $> 15^{\circ}\text{C}$. Previous studies have shown that above 1500 m of altitude, where MTCO is lesser than 15°C , modern pollen rain presents important qualitative variations (Bonnefille et al., 1999) and that this altitude limit corresponds to important changes in vegetation (Pascal, 1988). At a global scale, MTCO = 15.5°C is used to separate the tropical from the temperate biomes (Prentice et al., 1992). Therefore, our sampling strictly concerns tropical domain.

We have chosen the 2000-5000 mm/yr class of rainfall for two reasons. First, botanical studies have evidenced that under such rainfall, the structure, phenology as well as floristic composition of the low and medium elevation wet evergreen, evergreen and semi-evergreen forests are not “precipitation-dependent”, but are sensible to the length of the dry period (Pascal, 1988). The second reason is practical, as forests receiving such annual precipitation are well developed from the southern tip of India up to 16°N . Therefore, being found under various length of dry season, they offer the opportunity to study modern pollen rain of vegetation where rainfall, being abundant is not a limiting factor. The effect of the dry season can then be investigated without considering the amount of rainfall.

We have collected 71 samples between $8^{\circ}48'\text{N}$ and $15^{\circ}08'\text{N}$ of latitude, among which only ten of them have already been included in previous study (Bonnefille et al., 1999). The list of modern pollen sites along with details about geographic location (altitude, latitude, longitude), climate (length of the dry season, mean temperature of the coldest month) and vegetation (vegetation type, physiognomy, floristic type) is given in table 1.

According to bioclimates defined and mapped for south India (Pascal, 1982c), distribution of samples is the following: 24 samples in the class of dry season of 6-7 months, 8 in the class 5-6 months, 16 in the class 4-5 months, 7 in the class 3-4 and 16 in the class of dry season 2-3 months (figure 4). Vegetation types correspond to wet evergreen (low and medium elevation), evergreen, semi-evergreen and secondary moist deciduous as described previously. Most of the samples have been collected in forests, few in woodlands or thickets formations, one in a recent softwood plantation and two others from grasslands located at the edge of forests. Being more easily accessible, semi-evergreen forests under 6 to 7 months of dry season have been extensively sampled.

Samples	Location	Alti. (m)	Latitude N	Longitude E	Dry season (months)	mtco (°C)	Vegetation type	Physio- gnomy	Floristi c types	Σ Pollen
WG139	Digalamba	550	15°08'50"	74°26'10"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	500
WG150	Bisgod Road	545	14°59'10"	74°41'05"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	436
WG140	Yellapur	550	14°58'25"	74°42'15"	6-7	>23	Semi -evergreen	Woodland	g	499
WG141	Near Sabageri	560	14°56'55"	74°42'35"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	g	499
WG143	Yellapur	570	14°56'50"	74°41'55"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	498
WG142	Near Sabageri	560	14°56'45"	74°42'15"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	g	499
WG127	Gopishitta	200	14°55'50"	74°12'15"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	503
WG128	Gopishitta	150	14°55'35"	74°12'15"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	499
WG151	Magod falls	564	14°55'15"	74°42'25"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	500
WG126	Goteghali	100	14°54'55"	74°18'24"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	g	490
WG129	Near Hapkarani	148	14°54'50"	74°15'10"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	502
WG130	Near Hapkarani	90	14°54'35"	74°15'10"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	g	497
WG125	Goteghali	141	14°54'18"	74°18'24"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	g	491
WG131	Yana	350	14°34'35"	74°34'15"	6-7	>23	Evergreen	Forest	g	501
WG149	Harsikatte	500	14°25'50"	74°47'40"	6-7	>23	Evergreen	Forest	g	486
WG148	Sampegodu	628	14°25'30"	74°52'20"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	h	490
WG147	Jayanthigram	560	14°23'30"	74°56'55"	6-7	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	h	498
WG146	Tandige	573	14°23'20"	75°01'40"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	h	497
WG145	Near Kangodu	587	14°22'30"	74°56'25"	5-6	>23	Sec. moist deciduous	Thicket	h	489
WG144	Near Mankod	575	14°22'05"	74°55'10"	5-6	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	h	487
WG155	Gerusoppa	290	14°14'59"	74°39'43"	6-7	>23	Evergreen	Forest	f	497
WG154	Gerusoppa	90	14°14'58"	74°38'12"	6-7	>23	Evergreen	Woodland	f	493
WG152	Gerusoppa	110	14°14'57"	74°39'55"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	f	499
WG156	Gerusoppa	140	14°14'43"	74°40'05"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	f	501
WG153	Gerusoppa	135	14°14'40"	74°36'47"	6-7	>23	Evergreen	Forest	f	491
WG157	Gerusoppa	310	14°14'00"	74°40'00"	6-7	>23	Semi -evergreen	Forest	f	497
WG191	Kalkoppa	770	13°54'10"	75°24'00"	5-6	16-23	Sec. moist deciduous	Woodland	e	248
WG193	Basavanagadde	770	13°50'10"	75°22'50"	5-6	16-23	Semi -evergreen	Woodland	e	441
WG194	Yedavatti	640	13°46'00"	75°21'30"	5-6	16-23	Sec. moist deciduous	Woodland	f	500
WG195	Begavalli	630	13°42'50"	74°24'15"	5-6	16-23	Semi -evergreen	Forest	f	711
WG167	Karmara BSP23	661	13°30'10"	75°13'00"	5-6	16-23	Evergreen	Forest	f	400
WG165	Sringeri BSP25	710	13°25'05"	75°13'25"	5-6	16-23	Sec. moist deciduous	Forest	f	511
WG30	Mavankatte	170	12°36'30"	75°30'00"	4-5	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	c	499
WG29	Dotdotta	110	12°35'37"	75°27'10"	4-5	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	c	435
WG25	Onchalla	1000	12°28'45"	75°39'45"	4-5	16-23	Wet evergreen	Forest	k	499
WG28	Koyanad	130	12°28'10"	75°35'37"	4-5	>23	Soft wood plantation			479
WG27	Glencoorg	300	12°27'30"	75°36'15"	4-5	>23	Evergreen	Forest	c	492
WG26	Mannageri	730	12°26'10"	75°40'20"	4-5	16-23	Evergreen	Forest	c	495
WG23	Perambadi	860	12°08'15"	75°47'45"	4-5	16-23	Wet evergreen	Forest	j	496
WG19	Anjilha	320	11°50'40"	75°46'15"	4-5	>23	Evergreen	Forest	c	471
WG17A	Periya (tree)	760	11°50'00"	75°49'00"	4-5	16-23	Evergreen	Forest	j	486
WG17B	Periya (soil)	760	11°50'00"	75°49'00"	4-5	16-23	Evergreen	Forest	j	486
WG14	Manappadu	820	11°44'00"	75°49'45"	4-5	16-23	Evergreen	Forest	j	307
WG9	Anapara	820	11°33'15"	76°04'15"	3-4	16-23	Evergreen (riparian)	Forest	j	488
WG13	Tariyode disp.	730	11°32'30"	75°59'45"	4-5	16-23	Evergreen	Woodland	j	480
WG12	Pukkot	720	11°32'20"	76°01'52"	4-5	16-23	Sec. moist deciduous	Woodland	j	468
WG46	Patticard RF	150	10°31'00"	76°20'00"	4-5	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	b	235
WG47	Patticard RF	300	10°31'00"	76°20'00"	4-5	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	b	493
WG48	Patticard RF	500	10°31'00"	76°20'00"	4-5	>23	Wet evergreen	Forest	b	295
WG49	Malayatur RF	240	10°07'30"	76°48'45"	3-4	>23	Wet evergreen	Forest	b	293
WG101	Pamba	330	09°24'00"	77°01'15"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	502
WG95	Vadasserikara	470	09°23'30"	76°57'30"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	612
WG102	Kochandi	170	09°23'00"	76°59'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	515

WG98	Pamba	290	09°20'00"	77°04'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	138
WG99	Pamba	270	09°23'00"	77°04'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	304
WG97	Pamba	310	09°20'00"	77°05'15"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	439
WG100	Pamba	250	09°22'47"	77°03'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	391
WG94	Rajan Para	470	09°22'30"	76°55'15"	2-3	>23	Sec. moist deciduous	Woodland	b	246
WG96	Vadasserikara	400	09°23'30"	76°58'30"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	415
WG116	Kakki reservoir	600	09°19'15"	77°04'45"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	448
WG115	Kakki reservoir	680	09°19'15"	77°05'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	b	383
WG113	Kakki reservoir	880	09°19'15"	77°05'30"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	j	497
WG114	Kakki reservoir	880	09°19'15"	77°05'30"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	j	502
WG104	Kakki reservoir	990	09°19'15"	77°10'15"	3-4	16-23	Wet evergreen	Forest	j	495
WG105	Kakki reservoir	980	09°19'15"	77°05'15"	3-4	16-23	Wet evergreen	Forest	j	540
WG106	Kakki reservoir	990	09°19'00"	77°11'15"	3-4	16-23	Wet evergreen	Forest	j	180
WG107	Kakki reservoir	960	09°19'00"	77°11'15"	3-4	16-23	Wet evergreen	Grassland		517
WG112	Kakki reservoir	960	09°19'00"	77°05'47"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	j	492
WG51	Pongu Malai	750	08°49'00"	77°11'30"	3-4	16-23	Wet evergreen	Forest	a	164
WG53	Yeru RF	130	08°49'00"	77°03'00"	2-3	>23	Wet evergreen	Forest	a	576
WG52	Pongu Malai	180	08°48'00"	77°08'30"	2-3	>23	Wet evergreen	Grassland		503

Table 1: Geographic location, climate, and vegetation corresponding to the 71 modern pollen sampling sites. Samples are arranged according to decreasing latitude and given along with pollen sum (spores, introduced, cultivated and aquatic taxa excluded). Attribution of floristic types (cf. figure 3 for legend) is as per vegetation maps of Pascal (1982ab, 1984), Ramesh et al. (1997) and Pascal (1991).

Family	PollenTaxa	Included Taxa	Habit
Acanthaceae	<i>Thunbergia</i>		C
Anacardiaceae	<i>Buchanania</i>		AP
Arecaceae	<i>Calamus huegelianus</i>		C
Balanophoraceae	<i>Balanophora</i>		NAP
Begoniaceae	<i>Begonia</i>		NAP
Bignoniaceae	<i>Stereospermum</i>		AP
Caesalpiniaceae	<i>Humboldtia</i>		AP
Clusiaceae	<i>Calophyllum apetalum</i>		AP
Clusiaceae	<i>Calophyllum polyanthum</i>		AP
Clusiaceae	<i>Poeciloneuron</i>		AP
Convolvulaceae	<i>Ipomoea</i>		NAP
Dichapetalaceae	<i>Dichapetalum</i>		AP
Euphorbiaceae	<i>Antidesma</i>		AP
Euphorbiaceae	<i>Aporosa</i>		AP
Euphorbiaceae	<i>Micrococca</i>		NC
Lecythidaceae	<i>Careya</i> *	<i>Barringtonia</i>	AP
Leeaceae	<i>Leea</i>		NC
Loganiaceae	<i>Strychnos</i>		C
Meliaceae	<i>Cipadessa baccifera</i>		AP
Menispermaceae	<i>Coscinium</i>		AP
Mimosaceae	<i>Xylia xylocarpa</i>		AP
Rhizophoraceae	<i>Carallia</i>		AP
Rubiaceae	<i>Neonauclea purpurea</i> *	<i>Mitragyna, Haldina, Hymenodictyon, Uncaria</i>	AP
Sapindaceae	<i>Harpullia arborea</i>		AP
Staphyleaceae	<i>Turpinia</i>		AP
Verbenaceae	<i>Vitex</i>		AP

Table 2: List of the 26 new pollen taxa identified in modern pollen rain samples from the Western Ghats (to be added to the list for South India and Sri Lanka in Bonnefille et al., in press and Anupama et al., in press). AP: Arboreal Pollen, NAP: Non Arboreal Pollen, C: Climber, NC: Non Classified. * means 'type'.

Chemical treatment and Pollen analysis

Surface soil samples are sieved at 300 μm under distilled water to eliminate the coarse sediments and plant fragments. Chemical treatment of the samples follows standard method of acetolysis. The residue was filtered under a 5 μm sieve. Pollen counting and analysis were carried out under optical microscope (x50 and x100). During microscope analysis, a curve corresponding to the number of grains counted versus number of taxa found (equivalent to a species/area curve used by botanists) was drawn for each sample in order to obtain pollen spectra representative of the taxa diversity. Thus, we needed to count about 200 grains for samples from deciduous vegetation types and more than 500 pollen grains for samples from evergreen forests.

Pollen identification was based on comparisons with reference slides available at the French Institute of Pondicherry (about 20000 species of plants in India and Asia), photos and descriptions in pollen atlases (Guinet, 1962; Huang, 1972; Nayar, 1990; Tissot et al, 1994; Vasanthi, 1976).

Results

During the analysis, 154 pollen taxa have been identified: 101 are arboreal pollen (AP), 10 are climbers (C), 21 non arboreal pollen (NAP), 14 with undetermined habit (NC for non classified) and 8 from aquatic (Eriocaulaceae), introduced and/or cultivated plants (*Acacia* type, *Alnus*, *Casuarina*, *Cocos*, *Eucalyptus*, *Mimosa*, *Pinus*). Among the 154 taxa found, 128 have been identified in previous studies from India and Sri Lanka (Bonnetille et al., 1999; Anupama et al., 2000) and 26 are new (table 2). Eighteen new taxa correspond to trees and shrubs characteristic of the region, particularly those from the Clusiaceae (*Calophyllum apetalum*, *Calophyllum polyanthum*, *Poeciloneuron*), Euphorbiaceae (*Aporosa*), Lecythidaceae (*Careya* type), Mimosaceae (*Xylia xylocarpa*) and Rubiaceae (*Neonauclea purpurea* type which corresponds to *Haldina* common in semi-evergreen forests). Melastomataceae and Combretaceae families are included under the same pollen type such as Moraceae and Urticaceae. These two pollen types have a 'non classified' plant habit, as their origin can be arboreal or non-arboreal. However, trees of *Anogeissus* and *Terminalia* (Combretaceae) as well as *Artocarpus* and *Antiaris* (Moraceae), being very common in the semi-evergreen and evergreen forests sampled for this study, have been counted as arboreal taxa.

Pollen Diagram

The results of analysis of 71 surface soil samples are presented by the percentage pollen diagram illustrated on figure 5 (a and b) and drawn using GpalWin program (Goeury, 1997). Samples have been plotted following a south to north gradient. This latitudinal distribution corresponds also to an increasing dry season (figure 2c). However, there are few exceptions with samples located at the extreme south which experience longer dry season (3 to 4 months) than those located just northward (2 to 3 months) (table 1). This is due to their more inland location and the increasing west to east gradient of dry season. We preferred to adopt a representation according to latitude rather than to dry season as floristic composition of the forests under 2-3 or 3-4 months of dry season is similar (Pascal, 1988).

In the pollen diagram, we have illustrated percentages of 48 pollen taxa that occur at a frequency greater than 1% in more than 3 samples. Other pollen taxa have been lumped under the categories 'others AP' (arboreal pollen), 'Other C' (climber), 'other NAP' (non-arboreal pollen) and 'other NC' (non-classified). While drawing the synthetic diagram (figure 5b), climbers, lianas and epiphytes have been counted as arboreal pollen (AP) as they grow with the help of trees. The pollen sum for each sample (table 1) has been calculated keeping 'Unidentified' pollen but excluding spores, aquatic, introduced and/or cultivated taxa.

Cyperaceae have not been considered as aquatics because they are components of grass cover; for example, *Killinga triceps* occurs in dry lands of Travancore (Gamble, 1957). Percentages of excluded taxa and spores have been calculated on the total pollen sum.

Distribution of pollen taxa along the 8°48' to 15°08'N latitudinal gradient evidences five pollen zones corresponding to distinct pollen taxa associations. Pollen zones have been visually delimited. They are discussed according to increasing latitude.

Pollen zone I – (8°48'00" to 9°19'15"N)

Pollen samples WG52 to WG116 come mainly from the wet evergreen forests of the *Cullenia–Mesua–Palaquium* type at medium elevation (floristic type j in figure 3). Only two samples (WG51, WG53) are from the *Dipterocarpus indicus–Dipterocarpus boudillonii–Strombosia ceylanica* type at low elevation (a, figure 3). Arboreal pollen (AP) average 80%; the lowest percentages of AP (50%) being encountered for the two samples collected in grasslands at the edge of the forests (WG52, WG107). Climbers as well as all herbaceous components are under low percentages (less than 5%). Poaceae are recorded in all the samples, but in low proportions (10%). The arboreal pollen taxa presenting relatively high percentages and occurring in many samples are *Mallotus* type, *Madhuca*, *Ficus*, *Syzygium* type and Moraceae/Urticaceae. Also characteristic of the zone but presenting lower percentages and more sporadic occurrences are *Palaquium*, *Drypetes*, *Meliosma*, *Tetrameles nudiflora*, *Elaeocarpus*, *Cullenia exarillata* and *Trema orientalis*. Percentages of Melastomataceae/Combretaceae may reach 30% in the low elevation samples (WG52, WG53), while they are insignificant in the medium elevation ones (figure 5b).

Pollen zone II – (9°23'30" to 10°31'00"N)

Pollen samples WG96 to WG46, are exclusively from the *Dipterocarpus indicus–Dipterocarpus boudillonii–Strombosia ceylanica* low elevation wet evergreen type (b, figure 3). Pollen spectra from these forests are characterized by high percentages of arboreal pollen taxa (mean of 83%), including high proportions (about 20%) of *Piper* (WG95) and *Gnetum ula* (WG101, WG48, WG47) very abundant in some samples. Herbaceous pollen taxa are poorly represented in the pollen rain of these wet evergreen forests. Poaceae present the lowest percentages (mean of about 8%) in comparison with the four other zones. The main arboreal components for this pollen zone are *Tetrameles nudiflora*, *Mallotus* type, and *Elaeocarpus*. In almost all the samples of this region, pollen of *Schleichera oleosa* and *Aporosa* are present but at low frequencies. In these low elevation evergreen forests, Melastomataceae/Combretaceae present noticeable percentages (of about 10% to 30%) and high occurrence. *Tetrameles nudiflora* is the single emergent tree of the forest to be represented by high percentages in the pollen rain, although *Dipterocarpus* spp., *Vateria indica* (Dipterocarpaceae) and *Syzygium gardneri* (Myrtaceae) are very common emergent species.

Pollen zone III – (11°32'20" to 12°36'30"N)

Samples WG12 to WG30 are from the evergreen forests of the *Dipterocarpus indicus–Kingiodendron pinnatum–Humboldtia brunonis* type at low elevation and *Cullenia exarillata–Mesua ferrea–Palaquium ellipticum* type at medium elevation (c and j, figure 3). This pollen

zone is characterized by 75% of AP (including 7% of climbers) among which many taxa, such as *Tetrameles nudiflora*, *Elaeocarpus*, *Clausena*, *Cullenia exarillata*, *Hopea*, *Aglaia*, *Ixora*, *Olea dioica*, *Trema*, *Syzygium* type, the climber *Allophylus*, Moraceae/Urticaceae and Melastomataceae/Combretaceae present low and variable percentages (figure 5a). The relative abundance of “excluded taxa” such as *Eucalyptus*, *Acacia*, *Casuarina* (cultivated plants) and NAP, represented mainly by Poaceae (average 13%), Apiaceae and Compositae (average 2%) is noticeable. Melastomataceae/Combretaceae show the same pattern as in the two first zones and present higher percentages in the low elevation than in the medium elevation forests. *Lagerstroemia* and *Caryota* type are also found mainly at low elevation, while *Cullenia* and *Hopea* are present in pollen spectra from evergreen forests at medium elevation only.

Pollen zone IV – (13°25'05" to 13°54'10"N)

Pollen samples WG165 to WG191, are from semi-evergreen and evergreen formations of the *Dipterocarpus indicus*–*Diospyros candolleana*–*Diospyros oocarpa* and *Dipterocarpus indicus*–*Persea macrantha* floristic types (f and e, figure 3). This pollen zone is characterized by an average of 84% of AP, among which *Aporosa*, *Olea dioica*, *Celtis* and *Syzygium* type are present in all the samples. However, noticeable differences can be seen between pollen spectra of woodlands and forests. Woodland samples (WG194, WG193, WG191) are characterized by a relative abundance of herbaceous components (average 15%) and AP such as *Tetrameles nudiflora*, *Grewia*, *Schleichera oleosa* and Melastomataceae/Combretaceae. Forests samples (WG165, WG167, WG195) are characterized by an abundance of climbers such as *Gnetum* and occasionally *Tinospora* (mean of 22%), and AP such as *Clausena*, *Aglaia*, *Caryota*, *Neonauclea purpurea* type and Moraceae/Urticaceae.

Pollen zone V – (14°14'00"N to 15°08'50"N)

Pollen samples WG157 to WG139, have been collected mainly in the semi evergreen or secondary moist deciduous open forests and woodlands of the *Dipterocarpus indicus*–*Diospyros candolleana*–*Diospyros oocarpa* (f), *Diopsyros spp.*-*Dysoxylum malabaricum*-*Persea macrantha* (h) and *Persea macrantha*–*Diospyros spp.*-*Holigarna spp.* (g) floristic types (figure 3). Pollen zone V evidences high percentage of arboreal pollen (average of 73%), among which Melastomataceae/Combretaceae contribute for 22% and climbers for 7%. Herbaceous pollen are mainly represented by Poaceae which highest percentages are found in thicket (WG145, 62%) and woodlands (WG142, WG147, WG148, mean of 38%). Moraceae/Urticaceae which percentages do not exceed 1% are not significant anymore. The other arboreal pollen that can total 50% are *Aporosa*, *Syzygium* type and *Schleichera oleosa*, associated with *Tetrameles nudiflora*. Under low percentages, *Xantolis tomentosa*, *Holigarna*, *Randia* type, *Lannea* type, *Glochidion* type and *Xylia xylocarpa* occur in most samples.

Numerical analysis

We used Correspondence Analysis (CA) (Benzécri et col., 1973) to extract from the Western Ghats modern pollen data set, the parameters that induce repartition of pollen taxa. On multidimensional data matrix of pollen counts, CA produces a dispersion of both the observations (surface samples) and variables (pollen taxa) in a reduced two-dimensional factor space defined by two axes which represent hypothetical environmental gradients (Jolly et al., 1994; Vincens et al., 1997; Anupama et al., in press; Bonnefille et al., in press).

We used a simplified data matrix corresponding to the 71 observations (samples) and 142 variables (140 pollen taxa, plus Trilete and Monolete spores) for the CA. From the 154 identified pollen taxa, we have removed the aquatic, introduced and cultivated taxa, the single occurrences ('Sapotaceae', 'Rutaceae', 'Rosaceae' and 'Rubiaceae' pollen types), the 'Unidentified' and '*Piper*', being over represented in sample WG95. CA has been performed on raw pollen counts to preserve the information given by the pollen sum. In this work, particular attention has been given to check the reliability of the sampling strategy. Sampling effort relative to the length of dry season is given along with number of pollen grains counted in samples from different vegetation types (table 3). Sample repartition shows that number of pollen grain counted is sufficient and significant for all categories. However, due to fieldwork facilities semi-evergreen forests under 6-7 months of dry season have been more sampled. Another discrepancy in the sampling is noticeable in that most of the samples under 2-3 months of dry season have been collected in the low elevation evergreen forests, while most of the samples under 3-4 months of dry season have been collected in medium elevation evergreen forests.

Vegetation types		Dry season (months)					MTCO (°C)	Rainfall (mm/yr)	Total pollen grains
		2-3	3-4	4-5	5-6	6-7			
Wet evergreen	Low elevation	4791	288	1677				6756	
	Medium elevation	481	1818	2598				4897	
Evergreen					377	2347	> 16°C	2724	
Sec. moist deciduous		229		2044	2178	2900		7351	
Semi-evergreen					1111	6188		7299	
Other		493	511	463				1467	
Total pollen grains		5994	2617	6782	3666	11435		30494	

Table 3: Sampling effort as per the criteria of the length of dry season and vegetation. The total number of grains given according to classes of dry season and vegetation types is the one used for numerical analysis where introduced, cultivated, aquatics, 'Rutaceae', 'Rubiaceae', 'Sapotaceae', 'Rosaceae', 'Piper' and 'Unidentified' pollen taxa have been excluded. MTCO: mean temperature of the coldest month.

Dispersion of the samples

The CA obtained produces dispersion on three main axes, which all together explain 23.6% of the total inertia. All combinations were examined, but axes 1 and 3 give the most informative dispersion. Scatters of samples and taxa about axes 1 and 3 are presented in figure 6a and 6b.

Dispersion of the samples allows the distinction of four groups that may be delineated visually. Groups II and III at the negative end of axis 1 gather wet evergreen and evergreen forests. At the positive end of axis 1, groups I and IV gather mainly semi-evergreen and secondary deciduous formations (forests, woodlands and thickets). Axis 1 which explains 9.5% of inertia, clearly separates out forests under 2 to 5 months of dry season from those submitted to 5 to 7 months of dry season (figure 6a). Groups I and II at the positive end of axis 3, are constituted by a majority of samples which correspond to vegetation submitted to a mean temperature of the coldest month (MTCO) greater than 23°C. At the negative end of axis 3, groups III and IV represent vegetation submitted to a MTCO ranging from 16° to 23°C. Axis 3 which explains 6.9% of inertia, separates out vegetation according to mean temperature of the coldest month. Axis 2 explains 7.1% of the variance of the data set, but do not separate out distinct groups clearly related to environmental parameters.

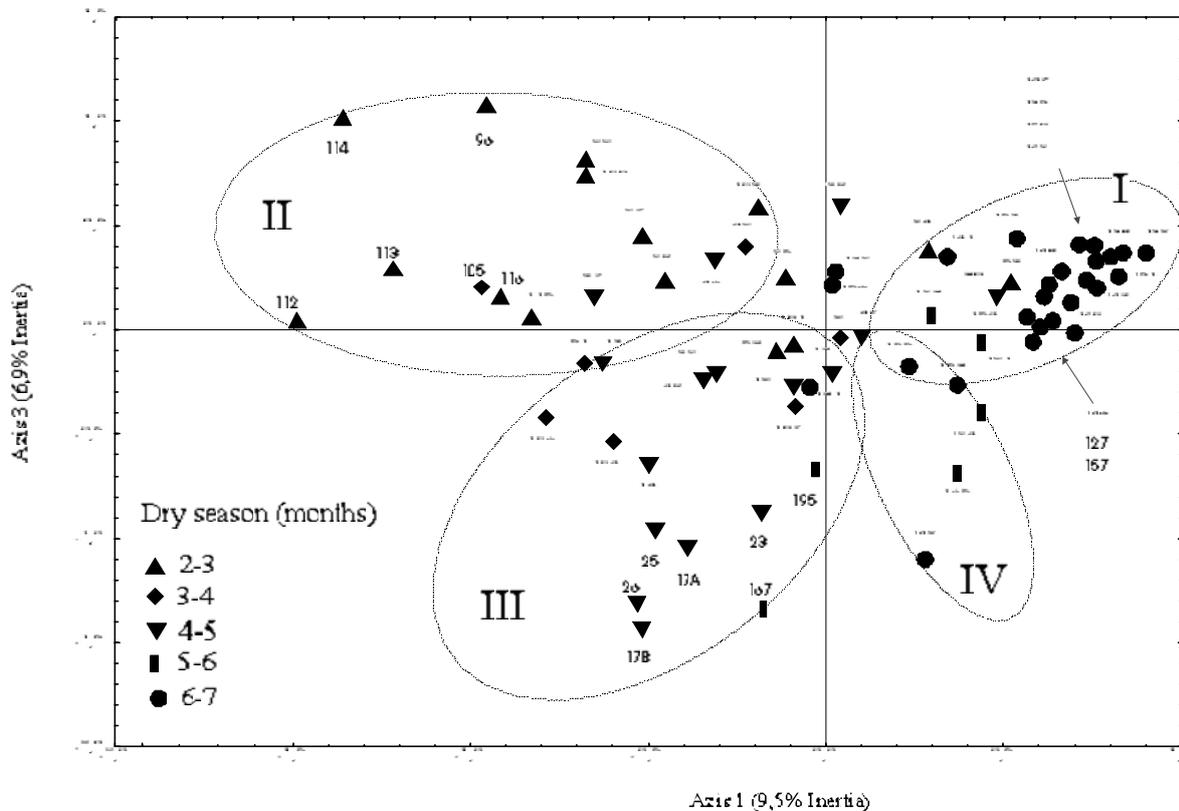


Figure 6: Dispersion of samples (6a) and pollen taxa (6b) about dimensions 1 and 3, produced by Correspondence Analysis carried out on a data matrix of raw counts corresponding to 71 samples and 142 pollen taxa.

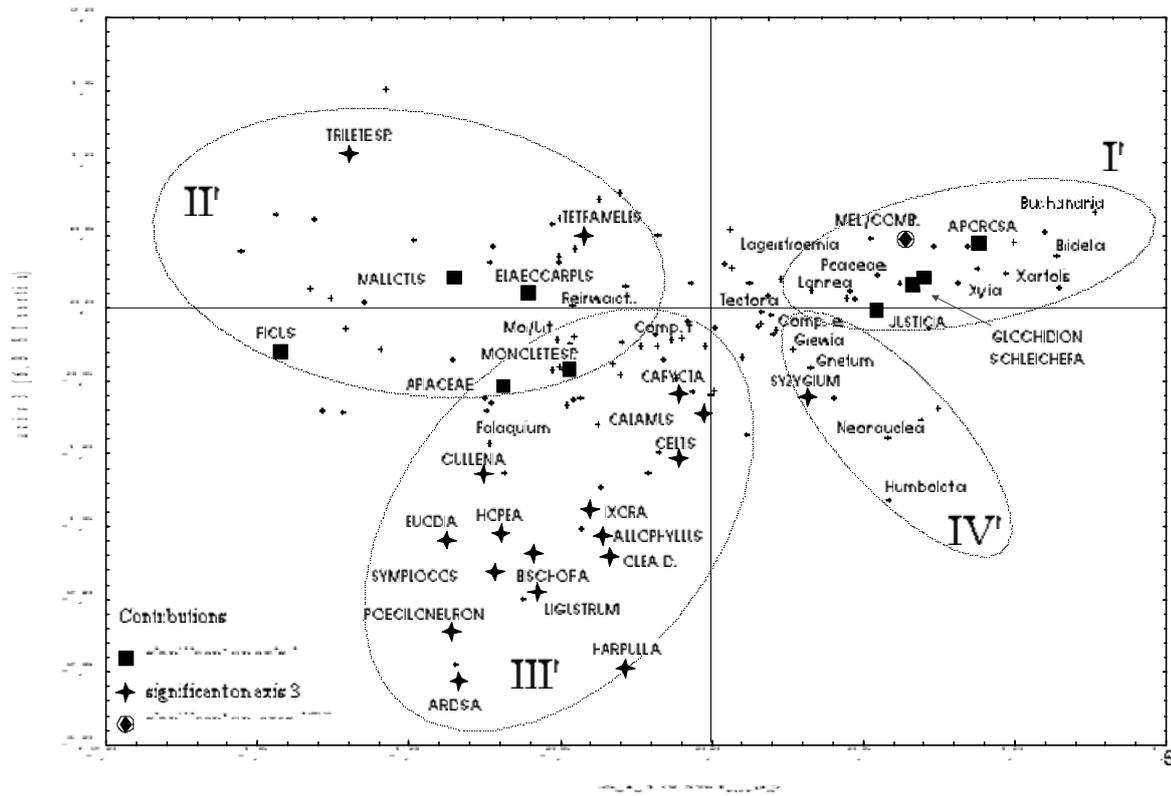


Figure 6 (*continued*): Dispersion of the pollen taxa (6b)

Interpretation of CA axes

On figure 7a, we have plotted axis 1-factorial coordinates of the 71 samples according to the respective classes of length of dry season to which they belong. This figure clearly shows that length of dry season increases from negative to positive end of axis 1. Correlation factor of 0.58 can be considered a rather good value, allowing the fact that dry season data are discrete variables. Hence, axis 1 can be interpreted as a gradient of the length of dry season.

The same presentation has been performed for axis 3-factorial coordinates of the samples, plotted versus MTCO classes of temperature used by botanists (figure 7b). This figure shows that samples submitted to mean temperature of the coldest month greater than 23°C are on the positive end of axis 3, while those submitted to MTCO lesser than 23°C are on negative end of axis 3. Correlation factor obtained is of 0.40. Temperature decreasing with increasing altitude, we plotted samples axis 3-factorial coordinates according to the respective altitude of pollen sites (table 1). However, the weak correlation obtained (0.1) (not represented), indicates that axis 3 most likely represents a temperature gradient.

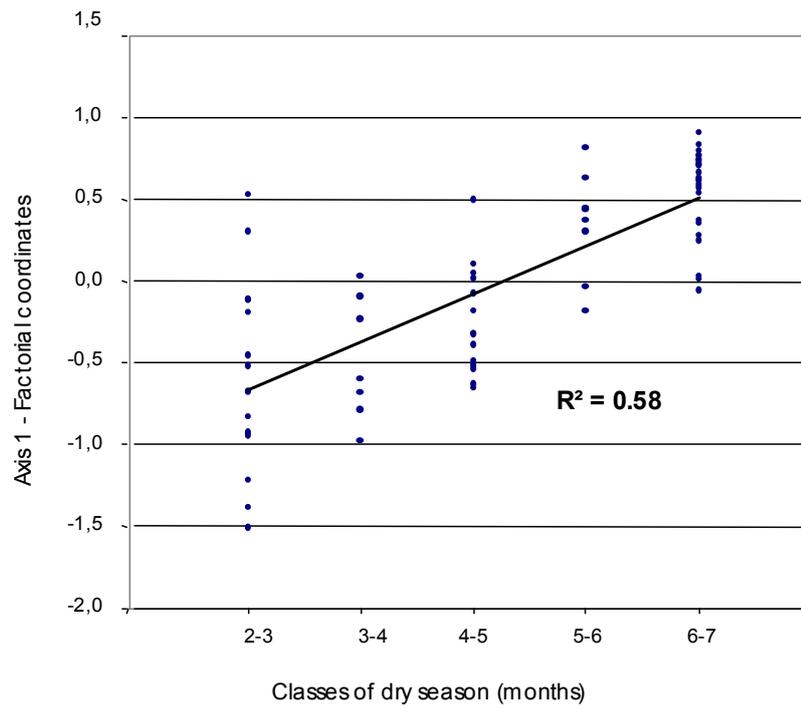


Figure 7a: Axis 1-factorial coordinates of the 71 samples versus the length of the dry season.

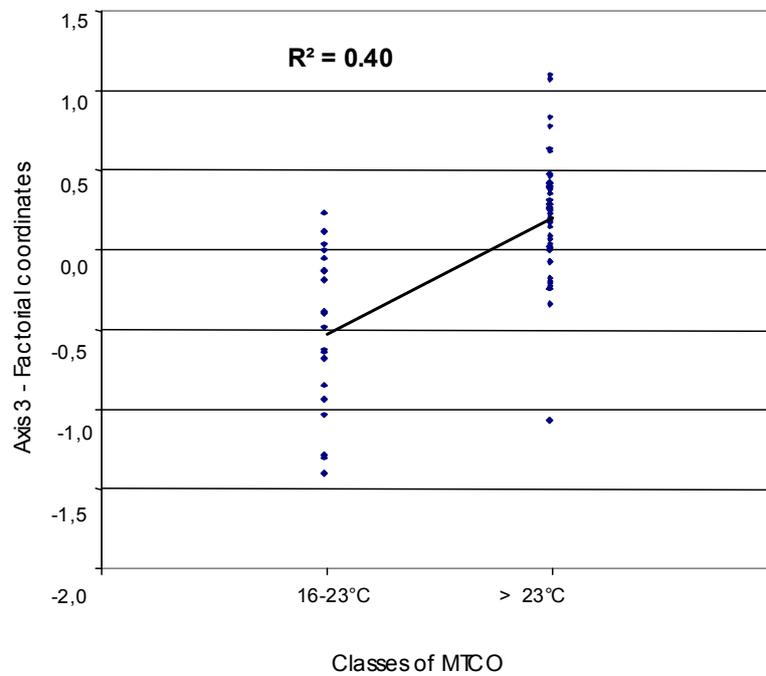


Figure 7b: Axis 3-factorial coordinates of the 71 samples versus classes of mean temperature of the coldest month (MTCO).

Dispersion of the pollen taxa

Dispersion of the pollen taxa is given in figure 6b and their contributions to inertia are given in table 4a and 4b. Taxa presenting absolute contribution greater than twice the mean ($2 \times 10000/142$) are considered as markers (Fenelon, 1981). Those having relative contribution greater than 10% are considered as associated markers. These criteria are similar to those applied in earlier palynological studies in India (Bonnefille et al., in press; Anupama et al., in press).

	Dry Season	Taxa markers	Contributions on Axis 1		
			Abs. > 141	Taxa associated	Rel. >10%
II' and III'	2 - 5 months	<i>Ficus</i>	658	Monolete spores	18.29
		<i>Elaeocarpus</i>	190	Apiaceae	13.38
		<i>Mallotus</i> *	2064		
		Trilete spores	1612		
		<i>Tetrameles nudiflora</i>	266		
I' and IV'	5 - 7 months	Melast./Combr.	1408	<i>Glochidion</i> *	15.88
		<i>Aporosa</i>	870	<i>Justicia</i>	13.33
		<i>Schleichera oleosa</i>	358		
		<i>Syzygium</i> *	165		

	MTCO	Taxa markers	Contributions on Axis 3		
			Abs. > 141	Taxa associated	Rel. >10%
I' and II'	> 23°C	Melast./Combr.	739		
		<i>Aporosa</i>	270		
		<i>Mallotus</i> *	208		
		Trilete spores	1679		
		<i>Tetrameles nudiflora</i>	532		
III' and IV'	16 - 23°C	<i>Syzygium</i> *	752	Monolete spores	13.48
		<i>Olea dioica</i> *	1897	<i>Bischofia</i>	20.33
		<i>Ixora</i> *	436	<i>Ardisia</i>	19.55
		<i>Harpullia</i>	361	<i>Symplocos</i>	17.96
		<i>Hopea</i>	295	<i>Ligustrum</i>	13.83
		<i>Celtis</i>	217	<i>Calamus</i> *	13.57
		<i>Cullenia exarillata</i>	161	<i>Caryota</i> *	13.32
		<i>Allophylus</i>	154	<i>Poeciloneuron</i>	12.12
		<i>Euodia</i>			10.23

Table 4: Absolute and relative contributions on axes 1 and 3 of pollen taxa markers of ranges of dry season (4a) and mean temperature of the coldest month (4b). Pollen taxa having high contributions on axes 1 and 3 are markers of both dry season and MTCO.

Dispersion of the samples about axis 1 evidences that over 5 months of dry season, wet evergreen and evergreen forests are replaced by semi-evergreen forests. Pollen taxa contributing strongly to define axis 1 are thus informative of the length of dry season and can be considered as markers of the corresponding vegetation. Hence, the markers of wet evergreen and evergreen forests are *Mallotus* type, *Ficus*, *Elaeocarpus*, Trilete spores, *Tetrameles nudiflora*, associated with Monolete spores and Apiaceae (group II' and III'). They also indicate a dry season lower

than five months (table 4a). Pollen taxa markers of semi-evergreen and secondary moist deciduous forests are Melastomataceae/Combretaceae, *Aporosa*, *Schleichera oleosa*, *Syzygium* type associated with *Glochidion* type and *Justicia* type (group I' and IV'). These pollen taxa also indicate a dry season longer than 5 months.

Dispersion of the samples about axis 3 evidences that pollen rain of tropical forests present significant correlation with mean temperature of the coldest month greater or lower than 23°C. Hence, Melastomataceae/Combretaceae, *Aporosa*, *Mallotus* type, Trilete spores and *Tetrameles nudiflora*, contributing strongly to define positive end of axis 3 (group III'), can be considered as pollen taxa markers of MTCO greater than 23°C (table 4b). *Syzygium* type, *Olea dioica*, *Ixora* type, *Harpullia*, *Hopea*, *Celtis*, *Cullenia exarillata*, *Allophyllus* and associated taxa such as *Poeciloneuron*, contributing strongly to define negative end of axis 3 (group III'), can be considered as pollen taxa markers of MTCO comprised between 16° and 23°C.

Trilete and Monolete spores, usually excluded from pollen analyses, contribute strongly to define the two factorial axes and happen to be significantly related to dry season and temperature (table 4ab). We carried out another CA after excluding the spores and obtained similar results, but slightly weaker correlation factors with R values of 0.50 for dry season and 0.29 for MTCO.

Discussion

Relation between pollen rain and tropical vegetation

Tropical forests in Asia are characterized by the abundance of Dipterocarpaceae (e.g. Ashton, 1964; Whitmore, 1975). This family dominates in the lowlands evergreen forests (types a, b, c, d, f of figure 3) of south India and in the deciduous Sal forests of central India. Importance value index (IVI) that integrates both frequency, dominance and size of a plant taxa (Cain et al., 1956), has been calculated for the forests that we have sampled and is comprised between 40 and 73 (Pascal, 1988). Among Dipterocarpaceae, species of *Dipterocarpus*, *Hopea* and *Vateria* are the most common in India. In the modern pollen rain of these forests, *Dipterocarpus* has been occasionally found. *Hopea* and *Vateria* (included in *Hopea* pollen type) are recorded, but under very low frequencies (less than 2 %). The weak representation of Dipterocarpaceae has already been noticed in the pollen rain of the *Shorea* tropical deciduous forests of central India (Chauhan, 1984). It is confirmed by the study presented here.

Another characteristic of lowland Western Ghats evergreen forests (types f and g) is the importance of Ebenaceae. This family is mainly represented by species of *Diospyros*. It progressively replaces Dipterocarpaceae when the dry season overpasses 5 months. Indeed, the measured IVI increases from 3 in the southern wet evergreen forests to more than 100 in the semi-evergreen forests located north of 13°N (Pascal, 1988). In the analysis presented here, *Diospyros* pollen is recorded with low percentages not exceeding 2%. However, in agreement with increased abundance of the taxa in vegetation, occurrence of *Diospyros* is more regularly recorded north of 13°N.

Western Ghats evergreen forests are also characterized by Lauraceae which become abundant above 850 m of altitude (Pascal, 1988; Ganesh et al., 1996). Lauraceae, represented by species such as *Cinnamomum*, *Actinodaphne* and *Neolitsea*, are not at all found in the pollen rain of the forests of south India. This is due to the fact that their pollen grains have a very thin exine that does not resist to acetolysis treatment (Raj & Van der Werff, 1988; Rowley & Vasanthy, 1993). The lack of Lauraceae in the pollen rain has been evidenced by previous studies from mountains in South Indian (Bera & Gupta, 1992), Eastern Ghats (Anupama et al., in press) and Sri Lanka (Bonnefille et al., in press).

Other characteristic of medium elevation evergreen forests in the investigated region is the abundance of *Cullenia* (Bombacaceae) and *Palaquium* (Sapotaceae) (Pascal, 1988; Ganesh et al., 1996). Pollen of these two taxa are certainly recorded in the corresponding samples (type j, figure 3), but with low percentages. Low pollen production and/or dispersion due to entomophilous mode of pollination could well explain the under-representation of these important components of wet evergreen forests.

It is remarkable that the main pollen taxa of Western Ghats forests, illustrated in the pollen diagram and sorted out by numerical analysis as well, are *Mallotus*, *Elaeocarpus*, *Tetrameles*, *Schleichera* and *Aporosa*. They occur in many samples with high percentages. These pollen types represent light-tolerant species of evergreen forests, particularly well developed in natural openings (Pascal, 1988). Light-tolerant species also considered as pioneers might optimize their extension by using efficient pollination processes such as high pollen production and anemophilous pollen dispersion.

In conclusion, our result evidence strong biases in the floristic composition between pollen rain and vegetation of the Western Ghats forests. Most dominant tall trees are under represented in the pollen rain whereas high pollen percentages come from plants which are not considered characteristic by botanical studies. Quantitative estimation of vegetation cover is not reproduced

by pollen composition. However, numerical analysis has also shown that other pollen taxa under low frequencies are very important to characterize the tropical forests.

Despite these discrepancies, pollen diagram and correspondence analysis illustrate several characteristic features of the modern pollen rain from evergreen forests in the Western Ghats of South India. These concern the relation between spatial structure of the forest and total of arboreal pollen and the distinction between different forest types on the basis of occurrence of pollen markers.

Spatial structure and Arboreal Pollen

Wet evergreen, evergreen and semi-evergreen forests are characterized by high tree density (Pascal, 1988; Ghate et al., 1998). Although the main tree components of these forests such as Dipterocarpaceae, Lauraceae and Ebenaceae are poorly recorded, the modern pollen rain do reflect well the abundance of trees in the vegetation. Indeed, the average proportion of arboreal pollen is greater than 70%. Such a high percentage of AP characterizes all types of evergreen forests from south to north (figure 4b). It fits proportions found for other evergreen forests in South India (Bera & Gupta, 1992; Gupta & Bera, 1996) and Sri Lanka (Bonnefille et al., in press). High percentages of AP seem to be a characteristic feature of evergreen forests in the tropics, both from Africa (Vincens et al., 1997) and South America (Rodgers III and Horn, 1996). Indeed, a value exceeding 50% discriminate them from deciduous vegetation, in which AP is no more than 25% to 50% (Gupta & Yadav, 1992; Bonnefille et al., 1993; Chauhan, 1994; Vincens et al., 1997; Anupama et al., in press).

It is remarkable that the lowest percentages of arboreal pollen are recorded between 11°30' and 12°30'N, in a region where plantations are extensively developed and between 14° and 15°N, where semi-evergreen forests under strong human pressure, are progressively replaced by woodlands and thickets (Pascal, 1988, 1993; Ramesh et al., submitted). Low AP content, associated with important proportions of herbaceous components (NAP) such as Poaceae, characterize the highly degraded deciduous thicket (WG145, 62%), woodlands (WG140, WG141, WG142, WG143, WG148, WG147, average of 34%), grasslands (WG52, WG107, average of 32%) and disturbed riparian forest (WG9, 40%). Therefore, pollen result indicates that in evergreen forest type, large fluctuations of Poaceae are a marker of a strong anthropogenic pressure. On top of other floristic criteria, botanists also distinguish wet evergreen from semi-evergreen forests on the basis of dense and loose canopy (Arora, 1966a, b; Pascal, 1986; Ghate et al., 1998). The AP/NAP pollen ratio does not properly reflect the density of tree cover, when it is biased by human impact.

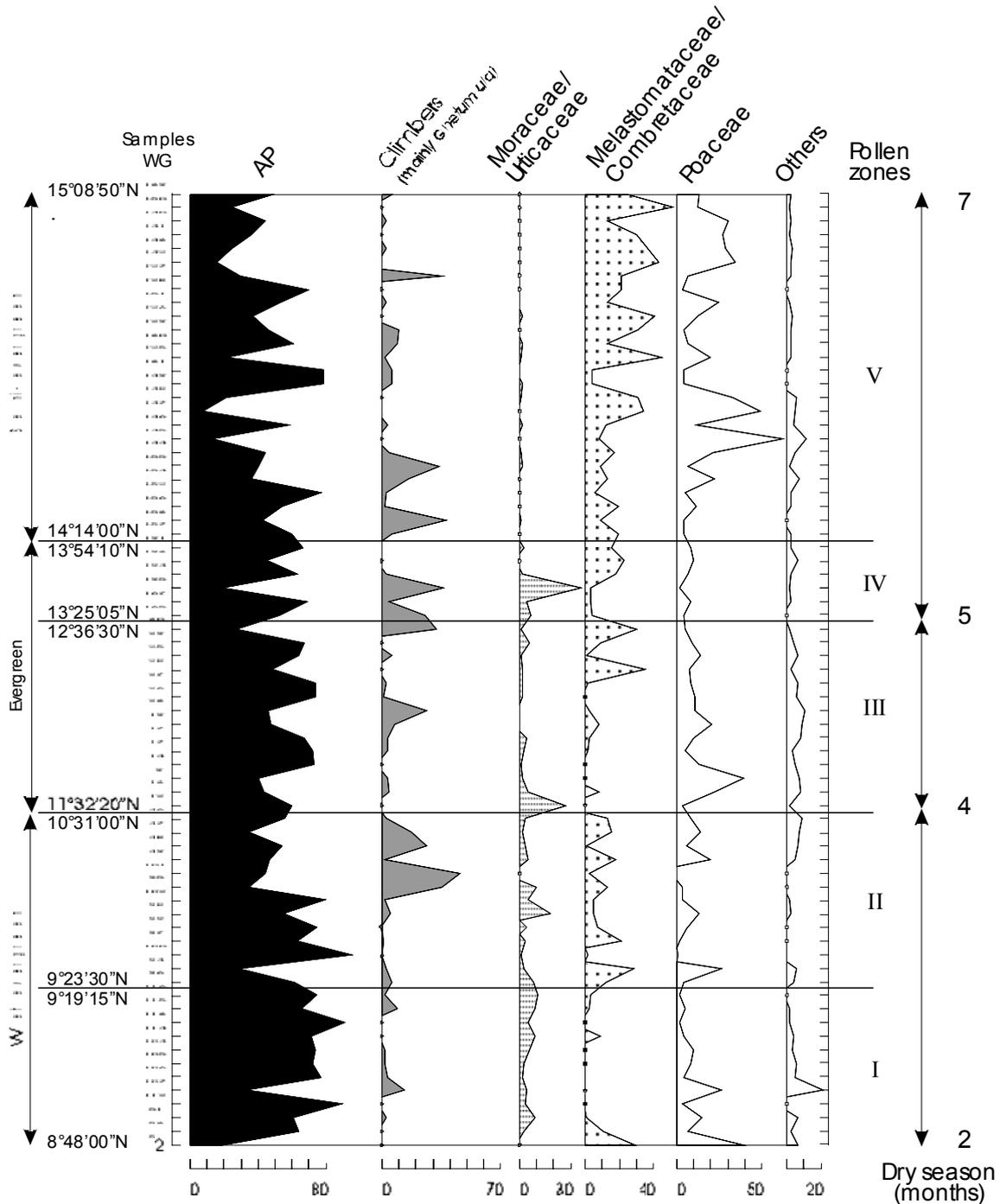


Figure 8: Pollen diagram of arboreal pollen (AP), Climbers (C), Moraceae/Urticaceae, Poaceae and others (others NAP and other Non Classified).

On the other hand, slightly disturbed or secondary evergreen forests (WG101, WG48, WG47, WG23, WG195, WG153, WG155, WG127, WG30, WG165) with high AP percentages, are characterized by high percentages of climbers such as *Gnetum ula* (10% to more than 40%). Botanical studies have shown that shade-regenerating species like the climber *Gnetum ula*, are more abundant at the edges of the forests and in openings (Arora, 1965, 1966a; Pascal, 1986, 1988; Ghate et al., 1997, 1998). Hence, the abundance of *Gnetum ula* clearly reflects the importance of naturally loose canopy such as in the semi-evergreen forests of north Karnataka region.

Forest types and pollen associations

Wet evergreen forests

Wet evergreen forests occur between 8° and 11°N and experience a dry season of 2 to 4 months. At low elevation (0-850 m), aside from *Dipterocarpus* spp. and *Vateria* (Dipterocarpaceae), tall and medium-sized trees of the canopy such as *Artocarpus*, *Antiaris*, *Ficus* (Moraceae), *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae), *Terminalia* (Combretaceae) and *Tetrameles nudiflora* (Tetramelaceae), are well represented in the pollen rain by high percentages. Small trees and shrubs from the undergrowth, such as *Aglaia* (Meliaceae), *Memecylon* (Melastomataceae), *Clausena* (Rutaceae), *Syzygium* and *Eugenia* (Myrtaceae) are also recorded, but with low frequencies. The importance of Euphorbiaceae in the low elevation wet evergreen forests (Pascal, 1988, 1991), is marked by relatively high percentages of *Mallotus* and the presence of *Drypetes* in the pollen rain.

At medium elevation (650-1400 m), pollen rain of wet evergreen forests evidence significant differences. The typical medium elevation species *Cullenia exarillata* (Bombacaceae) and *Palaquium ellipticum* (Sapotaceae) have low pollen percentages (Pascal, 1988; Ganesh et al., 1996). The pollen signal emphasizes the importance of *Mallotus*, although *Agrostistachys* and *Drypetes* are the most dominant Euphorbiaceae in the forests (Pascal, 1988, 1991). Significant percentages of *Syzygium* (Myrtaceae), *Hopea* (Dipterocarpaceae) and *Elaeocarpus* (Elaeocarpaceae) represent other common trees of the top canopy. Small trees of the undergrowth, like *Trema*, *Celtis* (Ulmaceae), *Clausena* (Rutaceae) and *Ixora* (Rubiaceae) are also represented.

Light-loving species such as *Gnetum ula*, *Grewia*, *Lagerstroemia*, *Schleichera oleosa* and *Aporosa*, are commonly represented in the pollen rain of the low elevation forests. Their presence suggests a loose forest canopy (Pascal, 1988). However, the weak representation of Poaceae and other herbaceous components, confirms the absence of wide openings, in agreement with field observations. Therefore, it is remarkable that the less accessible forests, i.e. those at medium elevation, evidence higher canopy density, than those in the lowlands under strong human pressure (Buchy, 1996).

Floristic composition of low and medium elevation wet evergreen forests is distinct. This distinction is clearly reproduced by pollen rain, although discrepancies between pollen and botanical markers exist as the abundance of a particular taxa in the pollen rain is not equal to the abundance of that particular taxa in the vegetation. The structure of the forests is nonetheless well represented by 1) high proportion of AP that indicates the dominance of trees, 2) strong

representation of tall emergent trees, 3) small and sporadic occurrence of light-tolerant elements such as climbers and pioneer species, which confirms the closeness of the wet evergreen formations.

Evergreen forests

Evergreen forests, located north of 11°N, experience a dry season of 4 to 5 months. They are located in a region where deforestation and anthropogenic pressure are high (Ramesh et al., submitted). Pollen signal of disturbance is given by the relative abundance of cultivated taxa (*Eucalyptus*, *Acacia*, *Casuarina*) and of Compositae, which convey the presence of plantations nearby as well as the abundance of the weed *Eupatorium* in the undergrowth (Ghate et al., 1998). Poaceae are also relatively abundant while light-loving species abundant in natural openings of evergreen forests, such as *Gnetum ula*, *Aporosa*, *Lagerstroemia* and *Schleichera oleosa*, are recorded in low frequencies, suggesting wide openings of in the tree canopy. Pollen rain of evergreen forests is distinguishable by the good representation *Olea dioica*, *Aglaia*, *Ixora*, *Celtis* and *Syzygium* which relatively high percentages evidence increased abundance of the corresponding taxa in the vegetation (Arora, 1965; Pascal, 1988). The modern pollen rain of evergreen forest does not show a clear pollen signal that could be marked by the common abundance of particular taxa in all the samples. This may result from the fact that this region serves as transition zone to certain species characteristic to southern and northern forests types of the Western Ghats (Ramesh and Pascal, 1993).

Semi-evergreen forests

Semi-evergreen forests are common north of 13°30'N, when dry season overpasses 5 months. Their pollen rain is distinguishable from those of evergreen and wet evergreen forests, by assemblages which reflect the increased abundance in the vegetation of light-tolerant evergreen trees such as *Aporosa*, *Macaranga*, *Mallotus*, *Syzygium* and *Holigarna*, as well as common deciduous species of *Terminalia*, *Tetrameles nudiflora* and *Schleichera oleosa* (Pascal, 1988). *Xylia xylocarpa*, abundant in the semi-evergreen forests where it can form monospecific communities (Arora, 1963, 1966b) is also well present in the pollen rain of all the samples from this zone and sometimes under noticeable percentages. Stronger representation of deciduous species in the pollen rain and increased frequency of climbers such as *Gnetum ula* evidence the more loose structure of forest (Arora, 1966b; Ghate et al., 1998). It is remarkable that between 13° and 14°14'N, components of evergreen forests such as *Celtis*, *Olea dioica*, *Haldina*, *Grewia* are still recorded in significant percentages, which may evidence the gradual changes occurring in floristic composition of the forests.

Pollen rain gives a good representation of the spatial and floristic structure of the vegetation. It shows that southern wet evergreen forests experiencing short dry season are distinct from northern semi-evergreen forests under long dry season. Evergreen forests are characterized by mixed elements from the two extreme forest types.

Pollen rain and climatic parameters

Results of the correspondence analysis show that Western Ghats evergreen forests are characterized by distinct pollen signal and that modern pollen taxa distribution is related mainly to the length of dry season and secondarily to temperature. The climatic ranges under which this relation remain valid are defined by a mean annual rainfall of 2000 to 5000 mm/yr and a mean temperature of the coldest month (MTCO) greater than 16°C.

Temperature

Previous analysis of modern pollen rain in South India has shown that high elevation Lauraceae/Ericaceae forests, characterized by *Ilex*, *Eleagnus* and *Rhododendron* pollen markers, are strongly distinct from the forests located below 1800 m. This evidences that the altitude limits of vegetation zoning established by botanists is well reproduced by pollen assemblages. Indeed, the MTCO limit of 15.5°C can be identified by pollen studies (Bonnefille et al., in press). However, the more refined distinction between low (0-850 m) and medium (650-1400 m) elevation forests could not be distinguished at that time, because an insufficient sample of these forests regarding the additional distinction between evergreen and deciduous. Here, by restricting our sampling to these two forest types, our numerical analysis shows that below 1000 m, composition of pollen rain allows a additional distinction according to a mean temperature of the coldest month greater or lesser than 23°C (figure 7b). Although altitude contributes to over 90% of the variation in species composition of Western Ghats evergreen forests (Ghate et al., 1997), our results evidence a better correlation with MTCO ($R = 0.40$) than with altitude (0.1). Discrepancies between altitude and temperature can be explained by factors such as exposure and orientation. Indeed, at same altitude, temperature values of stations exposed to monsoon winds can be 3°C lower than those on the leeward slope (Pascal, 1988). These local factors have great influence on temperature variations and contribute to 10% of the changes in species composition (Ghate et al., 1997).

Length of dry season

Our results show that composition of pollen rain is significantly correlated to the length of dry season ($R = 0.58$) (figure 7a). This is in agreement with the fact that several floristic types of evergreen forests occur between 8° and 16°N as a result of adaptation to increasing dry season (Pascal, 1988). A dry season limit at 5 months clearly separates southern wet evergreen forests pollen rain from the northern semi-evergreen forests submitted to more seasonal conditions. Therefore, this suggests that major changes of forest composition are well recorded by pollen signal. However, variations of pollen composition between wet evergreen and evergreen forests or between evergreen and semi-evergreen could not be related to a particular dry season limit. Our result is in agreement with botanical studies, which have shown that subtle variations induced by a short lengthening of dry season (e.g. from 6 to 8 months) are not significantly correlated with variations of species composition (Ghate et al., 1997).

The dry season limit at 5 months that we obtain reflects the important change in the forest composition as the strictly evergreen character disappears (Pascal, 1988). This limit at 5 months corresponds to a critical threshold in term of landscape and soil differentiation (Bourgeon, 1989; Gunnell, 1997). Important changes occur in soil, vegetation, and pollen when the benefits from a high rainfall are nullified by a long dry season (Woodward & Beerling, 1997; Stephenson, 1998).

Other numerical analyses on modern pollen rain had defined temperature as the main climatic factor having an impact on modern pollen taxa distribution (Bonnefille et al., in press; Bush, 1991; Rodgers & Horn, 1996; Vincens et al., 1997). Indeed, these studies focussed on vegetation distributed along altitude gradient. Here, by focussing on evergreen vegetation and by restricting the set of climatic/environmental conditions to altitude less than 1000m and rainfall ranging from 2000 to 5000 mm/yr, we extracted the dry season as main climatic factor and temperature as secondary factor.

Example of pollen markers of temperature and dry season

Abundance of Melastomataceae/Combretaceae pollen indicates $\text{MTCO} > 23^{\circ}\text{C}$. Its abundance in the samples from low elevation forests in India is similar to that found for the lowland evergreen forests of Costa Rica (Rodgers & Horn, 1996). This pollen taxa has been regularly sorted out by numerical analyses carried on modern pollen rain from South India, Sri Lanka and Western Uganda. In deciduous vegetation, correlation between Melastomataceae/Combretaceae pollen and rainfall was found negative both in India (Anupama et al., in press) and Africa (Chalié et al., 1990). However, due to the fact that deciduous vegetation is mainly restricted to lowlands in the tropics, its relation with altitude/temperature

has not been clearly demonstrated (Vincens et al., 1997; Bonnefille et al., in press). Here, by considering a large set of samples from a single vegetation type experiencing similar rainfall, we have been able to demonstrate that Melastomataceae/Combretaceae pollen taxa is a marker of warm conditions. CA has also defined this taxa as a marker a long dry season (> 5 month). This fits its distribution in the Eastern Ghats and in the Lake Albert area in Western Uganda, where dry season ranges from 6 to 8 months. This is a promising result as it suggests that pollen taxa such as Melastomataceae/Combretaceae carry a climatic signal that is valid worldwide.

In our study *Mallotus* pollen type, which includes the genus *Macaranga*, has been sorted out as a marker for wet evergreen forests related to a short dry season (< 5 months). Such as already established for evergreen forests in South India, Sri Lanka (Bonnefille et al., in press) and Western Uganda (Vincens et al., 1997). *Mallotus* type has been associated to relatively high rainfall/humidity (Anupama et al., in press). Our result is in agreement with these studies in that it indicates that distribution of *Mallotus* is restricted to evergreen vegetation. Consequently, it implies that climatic distribution of *Mallotus* pollen is defined by a rainfall greater than 1500 mm/yr. Its distribution in the Eastern Ghats and Ruwenzori Mountains of Western Uganda, where dry season do not exceed 5-6 months, corresponds pretty well to our result which define *Mallotus* pollen type as a marker of short dry season. Our results of numerical analysis suggest also that *Mallotus* pollen is related to MTCO $> 23^{\circ}\text{C}$. However, its altitude distribution varies from 0 to 1800 m in South India and Sri Lanka, and from 1200 m up to 4600 m in Western Uganda. Discrepancy between *Mallotus* altitude distribution in India and Africa can be explained by the fact that this pollen taxa includes many plant genera such as *Trewia*, *Cleidion* and *Macaranga*, which occupy different kinds of habitats (Pascal, 1988). Hence, *Mallotus* pollen type is more likely to be related to high rainfall and short dry season (< 5 months) than to temperature.

Syzygium type has been defined in our study as characteristic pollen of semi-evergreen forests. It has been sorted out by numerical analysis as a marker of evergreen forests as opposed to deciduous in South India (Anupama et al., in press) and Sri Lanka (Bonnefille et al., in press). In Western Uganda, abundance of *Syzygium* characterizes the swamp forests of the Rukiga Highlands (Vincens et al., 1997). Geographical distribution of *Syzygium* pollen in these regions seems to be related to relatively high rainfall/humidity, although many species such as *S. cumini* are found in both deciduous thickets and wet evergreen forests (Pascal, 1988, 1986). In the Western Ghats and under mean annual rainfall of 2000-5000 mm/yr, greatest abundance of *Syzygium* type is found when dry season overpasses 5 months. This is in agreement with the occurrence of *Syzygium* pollen in other regions from India and Africa where length of dry

season is similar. Altitude distribution of *Syzygium* pollen varies from 0 to 2400 m in South India and between 1800 and 3000 m in Western Uganda. This implies that *Syzygium* is not a good marker of altitude/temperature. Therefore, climatic range of *Syzygium* pollen may be defined by a relatively high rainfall combined with a rather long dry season.

Our work helps defining specific pollen markers for South India presenting particular relationship with temperature and dry season. However, pollen taxa markers of dry season alone are difficult to define in that length of dry season is a combination of temperature and rainfall (Bagnouls and Gaussen, 1953). Further analyses should be carried out with specific (not discrete) climate data and with other parameters such as the ratio of actual evapotranspiration to equilibrium evapotranspiration (α coefficient) (Hare, 1980), better adapted to estimate the annual amount of growth limiting drought stress on plants (Prentice et al., 1992).

These results help defining the bioclimatic ranges of plant taxa. They have an application in validating the biomization method for assigning plant assemblages to biomes in India on a world wide basis, such as for tropical Africa (Jolly et al., 1998; Jolly et al., in press).

Conclusion

Focussing this study on evergreen forests in the same range of altitude (< 1000 m) and rainfall (2000 to 5000 mm/yr), we have been able to evidence pollen response to dry season. Along the latitude gradient, a succession of five distinct pollen associations characterizes modern pollen rain of evergreen forests under similar rainfall. This indicates that a lengthening of the dry season is responsible of significant changes in floristic composition of the forests from south to north. Southern forests submitted to a dry season shorter than 5 months are characterized by pollen markers typical components of wet evergreen forests. Northern forests submitted to a dry season longer than 5 months are characterized by pollen markers typical of semi-evergreen and deciduous forests. We have suggested that the temperature limit 23°C could be further investigated in the tropical region.

Acknowledgements

We would like to acknowledge the French Ministry of Foreign Affairs which provided grants through the French Institute of Pondicherry (FIP), and Indian authorities from the Forests departments of Tamil Nadu, Kerala and Karnataka which provided authorizations to collect samples and fieldwork facilities. At the FIP, we thank the Ecology Department and Geomatics Lab for providing maps. Our best thanks are due to S. Sabaraj for technical assistance and R. Michon for adapting the physic and bioclimate maps of South India to our study.

References

- Anupama, K., Ramesh, B.R. & Bonnefille, R., 2000. The modern pollen rain from the Biligirirangan-Melagiri hills of Southern Eastern Ghats, India. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 108: 175-196.
- Arora, R.K., 1963. The forests of North Kanara District. 3. Evergreen type. *Journal of Indian Botanical Society*, 42: 38-60.
- Arora, R.K., 1965. Ecological notes on the vegetation of Coorg District, Western Ghats. *Indian Forester*, 91: 722-742.
- Arora, R.K., 1966a. The vegetation of South Kanara District, Western Ghats. 3. Evergreen type. *Journal of Indian Botanical Society*, 45: 304-316.
- Arora, R.K., 1966b. The vegetation of South Kanara District, Western Ghats. 3. *Xylia*-mixed type. *Journal of Indian Botanical Society*, 45:127-137.
- Ashton, P.S., 1964. Ecological studies in the mixed Dipterocarp forests of Brunei State. *Oxford Forestry Memoirs N°25*, Univ. Oxford, 75 pp.
- Bagnouls, F. & Gaussen, H., 1953. Saison sèche et indice xéothermique. Documents pour les cartes des productions végétales 3(1), 47 p. Toulouse.
- Benzécri, J.P. & Collaborators, 1973. L'analyse des données, II. L'analyse des correspondances. Dunod, Paris, pp. 619.
- Bera, S.K. & Gupta, H.P., 1992. Correlation between pollen spectra and modern vegetation of Anamalai Hills, Tamil Nadu. *Geophytology*, 22: 239-245.
- Bonnefille, R., Roeland, J.C & Guiot, J., 1990. Temperature and rainfall estimates for the past 40,000 years in equatorial Africa. *Nature*, 346: 346-349.
- Bonnefille, R., Buchet, G., Friis, I., Ensermu Kelbessa & Mohammed, M.U., 1993. Modern pollen rain on an altitudinal range of forests and woodlands in South West Ethiopia. *Opera Bot.* 121, 71-84.
- Bonnefille, R., Anupama, K., Barboni, D., Pascal, J.P., Prasad, S. & Sutra, J.P. 1999. Modern pollen spectra and vegetation from tropical South India and Sri Lanka. *Journal of Biogeography*, 1255-1280.
- Bourgeon, G., 1989. Explanatory Booklet on the Reconnaissance Soil Map of Forest Area, Western Karnataka and Goa. Institut Français de Pondichéry, 96 pp.
- Buchy, M., 1996. Teak and Arecanut. Colonial State. Forest and People in the Western Ghats (South India). 1800-1947. Publications du Département de Sciences Sociales, 2. Institut Français de Pondichéry & Indira Gandhi National Centre for the Art, New Delhi.

- Bush, M.B., 1991. Modern pollen rain data from South and Central America. *The Holocene* 1: 162-167.
- Cain, S.A., Castro, D.O, Pires, J.M. & Silva, N.T.Da., 1956. Application of some physiological techniques to Brazilian rain forest. *Am. J. Bot.*, 43: 911-941.
- Chalié, F., Edorth, T.M., Bonnefille, R., Guiot, J. and Roeland, J.C., 1990. Signal de la pluviosité dans les données polliniques actuelles du Togo. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311(2): 893-899.
- Chalié, F., 1992. Paleoclimatologie quantitative en Afrique orientale depuis 40 000 ans, pollens et statistiques. Unpublished thesis, University of Aix-Marseille III. 160 pp.
- Chauhan, M.S., 1994. Modern pollen/vegetation relationship in the tropical deciduous Sal (*Shorea robusta*) forests in District Sidhi, Madhya Pradesh. *Journal of Palynology*, 30: 165-175.
- Cheddadi, R., Yu, G., Harrison, S.P. & Prentice, I.C., 1997. The climate of Europe 6000 years ago. *Climate Dynamics*, 13: 1-9.
- Fenelon, J.P., 1981. Qu'est-ce que l'analyse des données?. Lefonen, Paris, 309 pp.
- Gadgil, S. & Joshi, N., 1983. Climatic clusters of the Indian region. *J. Climatol.*, 3: 47-63.
- Gamble, J.S. 1957. Flora of the Presidency of Madras. London. 3 Vol. 1916-1935.
- Ganesh, T., Ganesan, M., Devy, S., Davidar, P. & Bawa, K.S., 1996. Assessment of plant biodiversity at a mid-elevation evergreen forest of Kalakad-Mundanthurai Tiger Reserve, Western Ghats, India. *Current Science*, 71(5): 379-391.
- Ghate, U., Bhagwat, S., Gokhale, Y.n., Gour-Broome, V. & Barwe, V., 1997. Assessing the tropical forest plant diversity: a case study from the Western Ghats, India. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 23: 419-444.
- Ghate, U., Joshi, N. V. & Gadgil, M., 1998. On the patterns of tree diversity in the Western Ghats of India. *Current Science*, vol. 6, 594-603.
- Goeury, 1997. Gpalwin: gestion, traitement et représentation des données de la paléocologie. Xvème Symposium de l'A.P.L.F. Lyon 1-3 Sept. 1997, 31 p.
- Guiot, J., Cheddadi, R., Prentice, I.C. & Jolly, D., 1996. A method of biome and land surface mapping from pollen data: application to Europe 6000 years ago. *Paleoclimates*, 1: 311-324.
- Guinet, Ph., 1962. Pollens d'Asie tropicale. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech.*, 5, 8 p., 52 pl.
- Gunnell, Y., 1997. Relief and climate in South Asia: the influence of the Western Ghats on the current climate pattern of Peninsular India. *International Journal of Climatology* 17, 1169-1182.
- Gupta, H.P. & Bera, S.K., 1996. Silent Valley: A correlation between pollen spectra and vegetation. *Palaeobotanist*, 43(2): 139-144.
- Gupta, H.P. & Yadav, R. R., 1992. Interplay between pollen rain and vegetation of Tarai-Bhabar in Kumaon Division, U. P., India. *Geophytology* 21, 183-189.
- Hare, F.K., 1980. Long-term annual surface heat and water balances over Canada and United States south of 60°N: reconciliation of precipitation, runoff and temperature fields. *Atmosphere-Ocean*, 18: 127-153.
- Howe, S.E. & Webb, T.III., 1983. Calibrating pollen data in climatic terms: Improving the method. *Quaternary Science Reviews*, 2: 17-51.
- Huang, T.C., 1972. Pollen flora of Taiwan. National Taiwan Univ., Botany Dept. Press. 297 p.
- Jolly, D., Bonnefille, R. and Roux, M., 1994. Numerical interpretation of a high resolution Holocene pollen record from Burundi. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 109: 357-370.
- Jolly, D., Burq, S., Bonnefille, R. & Roux, M., 1996. Représentation pollinique de la forêt dense humide du Gabon, tests statistiques. *C.R. Acad. Sci., Paris* 322, 2a 63-70.

- Jolly, D. and Collaborators, 1998. Biome reconstruction from pollen and plant macrofossil data for Africa and the Arabian peninsula at 0 and 6000 years. *Journal of Biogeography*, 25: 1007-1027.
- Jolly, D., Prentice, I.C., Guiot, J., Bengo, M., Bonnefille, R., Brénac, P., Buchet, G., Edorth, T., Elenga, H., Lézine, A.M., Maley, J., Peyron, O., Reynaud-Farrera, I., Riollet, G. & Vincens, A., in press. Reconstitution de biomes à partir des données polliniques actuelles d'Afrique de l'Ouest. *Géographie Physique et Quaternaire*.
- Nayar, T.S., 1990. Pollen flora of Maharashtra State, India. Today & Tomorrow's Printer and Publishers, Delhi. 150 p.
- Pascal, J-P., 1982a (with the collaboration of S. Shyam Sunder & V.M. Meher-Homji). Forest map of South India – sheet: Mercara-Mysore. Published by the Karnataka and Kerala Forest Departments and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
- Pascal, J-P., 1982b (with the collaboration of S. Shyam Sunder & V.M. Meher-Homji). Forest map of South India – sheet: Shimoga. Published by the Karnataka and Kerala Forest Departments and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
- Pascal, J-P., 1982c. Bioclimates of the Western Ghats at 1/500 000 (2 sheets). *Inst. fr. Pondichéry, hors série 17.*
- Pascal, J-P., 1984. (with the collaboration of S. Shyam Sunder & V.M. Meher-Homji). Forest map of South India – sheet: Belgaum-Dharwar-Panaji. Published by the Karnataka Forest Department and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
- Pascal, J-P., 1986. Explanatory booklet on the forest map of South India. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech.*, hors série 18, 88 p.
- Pascal, J-P., 1988. Wet evergreen forests of the Western Ghats of India. Ecology, structure, floristic composition and succession. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech.*, XX bis, 345 p.
- Pascal, J-P., 1991. Floristic composition and distribution of evergreen forests in the Western Ghats, India. *Palaeobotanist*. 39 (1), 110-126.
- Pascal, J-P., 1993. Management oriented forest map of South India: thematic derivations. *Vegetatio*, 109: 47-61.
- Prentice, I.C., Bartlein, P.J. & Webb, T.III., 1991. Vegetation and climate changes in eastern North America since the last glacial maximum. *Ecology*, 72: 2038-2056.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A & Solomon, A.M., 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeogr.* 19: 117-134.
- Raj, B. & Van der Werff, H., 1988. A contribution to the pollen morphology of Neotropical Lauraceae. *Annals of Missouri Botanical Garden*, 75:130-167.
- Ramachandran, G. & Banerjee, A.K., 1983. The sub-divisional rainfall distribution across the Western Ghats during the southwest monsoon season. *Mausam*, 34:179-184.
- Ramesh, B.R., Pascal, J.P., Geomatics by C. Nougier, 1997. Atlas of Endemics of the Western Ghats (India). Publication of the French Institute of Pondicherry.
- Ramesh, B.R., Salvador, S. & Delattre E., (submitted). Assessment of deforestation and anthropogenic pressure in the Western Ghats, India: A case study of Kodagu District.
- Ramesh, B.R. & Pascal, J-P., 1993. Five new additions to the flora of Karnataka, *J. Bombay Nat. Hist. Soc.*, 90: 323-326.
- Ramesh, B.R., De Franceschi, D. & Pascal, J-P., 1998. Forest map of South India – Sheet Thiruvananthapuram-Tirunelveli. Published by the Kerala and Tamil Nadu Forest Departments, Kerala Forest Research Institute, and French Institute Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry. trav. sec. sci. tech. Hors serie 18.*

- Roeland, J.C., Guiot, J. & Bonnefille, R., 1988. Pollen et reconstruction quantitative du climat. Validation des données d'Afrique orientale. C. R. Acad. Sci. Paris, 307(2); 1735-1740.
- Rodgers III, J.C. & Horn, S.P., 1996. Modern pollen spectra from Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 124: 53-71.
- Rowley, J.R. & Vasanthy, G., 1993. Exine development, structure and resistance in pollen of *Cinnamomum* (Lauraceae). *Grana supplement*, 2: 49-53.
- Singh, N., 1986. On the duration of the rainy season over different parts of India. *Theor. Appli. Climatol.*, 37: 51-62.
- Stephenson, N.L., 1998. Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *Journal of Biogeography*, 25: 855-870.
- Tissot, C., Chikhi, H. & Nayar, T.S., 1994. Pollen of wet evergreen forests of the Western Ghats, India. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech.*, 35, 133 p.
- Vasanthy, G., 1976. Pollens des montagnes du Sud de l'Inde (Pollen of South Indian hills). *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech.* 15, 74 p.
- Vincens, A., Chalié, F., Bonnefille, R., Guiot, J. & Tiercelin, J.J., 1994. Pollen-derived rainfall and temperature estimates from Lake Tanganyika and their implication for Late Pleistocene water levels. *Quat. Res.*, 40: 343-350.
- Vincens, A., Ssemmanda, I., Roux, M. & Jolly, D. 1997. Study of the modern pollen rain in Western Uganda with a numerical approach. *Rev. Paleobot. Palynol.* 96: 145-168.
- Webb, T.III., Bartlein, J.P., Harrison, S.P. & Anderson, K.H., 1993. Vegetation, lake-levels and climate in eastern North America since 12000 y BP. In: Wright H.E. Jr., Kubitzbach J.E., Webb T.III., Ruddiman W.F., Street-Perrott, F.A. & Bartlein J.P. (eds). *Global climates since the last glacial maximum*. University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 415-467.
- Whitmore, T.C., 1975. *Tropical rain forests of the Far East*. Oxford Univ. Press, Oxford. 282 pp.
- Woodward, F.I. & Beerling, D.J., 1997. The dynamics of vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6: 413-418.

Résumé de l'article

Nous avons analysé le contenu pollinique de 71 échantillons de surface de sol provenant des forêts sempervirentes humides, sempervirentes et semi-sempervirentes des Ghâts occidentaux de l'Inde du sud, entre 8°48'N et 15°08'N. Les sites polliniques sont localisés à basse et moyenne altitude (<1000 m), sous des conditions humides (pluviométrie comprise entre 2000 et 5000 mm/an) et chaudes (température moyenne du mois le plus froid, MTCO > 16°C). La région étudiée subit l'influence directe d'une distribution saisonnière des pluies de mousson, selon un gradient sud-nord de longueur de saison sèche croissante.

Les diagrammes polliniques et les analyses factorielles de correspondances montrent que des associations polliniques et des taxons marqueurs distincts caractérisent la pluie pollinique des forêts sempervirentes et semi-sempervirentes. L'abondance des pollens de Melastomataceae/ Combretaceae, associés aux pollens d'*Aporosa*, *Schleichera oleosa* et type *Syzygium* caractérise la pluie pollinique des forêts semi-sempervirentes soumises à une longue saison sèche (5 à 7 mois). Les forêts sempervirentes humides adaptées à une courte saison sèche (2 à 5 mois) sont caractérisées par les pollens de *Ficus*, *Elaeocarpus*, type *Mallotus* et *Tetrameles nudiflora*. Les forts pourcentages des pollens de Melastomataceae/ Combretaceae, associés à Type *Mallotus* et *Tetrameles nudiflora* caractérisent les forêts sempervirentes de basse altitude, où MTCO est >23°C, alors que les pollens type *Syzygium*, *Olea dioica* caractérisent les forêts de moyenne altitude, où MTCO est compris entre 16° et 23°C.

En accord avec une forte densité du couvert arboré, la proportion des pollens arborés (AP) reste importante dans tous les types de forêts, et constante quelle que soit la longueur de la saison sèche. Les forêts sempervirentes perturbées par l'action anthropique et qui présentent une canopée ouverte sont caractérisées par une pluie pollinique dans laquelle les pollens de lianes (*Gnetum ula*) sont abondants.

2. Pluie pollinique actuelle et végétation

Pour être discutée en rapport avec la végétation, la présentation des résultats des analyses palynologiques des 180 échantillons de surface peut être effectuée selon différentes combinaisons correspondant au tableau II.1 ou à la figure I.6. On peut présenter les résultats selon un gradient altitudinal comme dans la publication n°1 (Bonnefille *et al.*, 1999), soit selon un gradient de pluviosité (publication n°2, (Barboni and Bonnefille, submitted)), soit selon un gradient latitudinal de longueur de la saison sèche (publication n°3, (Barboni *et al.*, submitted)). On trouvera dans ces articles les discussions correspondant à la relation entre la composition floristique des différents types de forêts et la composition de la pluie pollinique.

Certains spectres obtenus (70) n'ont pas été intégrés dans les articles publiés ou en cours de publication. Plutôt que de présenter ces 70 spectres (dispersés dans les différents types de végétation), il nous a paru nécessaire de montrer les caractéristiques de chaque type de végétation défini par les botanistes (Pascal, 1986; Pascal, 1988; Ramesh *et al.*, 1998) : 1) les forêts sempervirentes, 2) les forêts semi-sempervirentes, 3) les formations secondaires et 4) les formations décidues. Ce qui nous a amené à présenter l'ensemble des 180 spectres.

2.1. Signature pollinique des types de végétation

- **Forêts sempervirentes (Figure III.7)**

Les spectres polliniques obtenus à partir des échantillons de sol prélevés dans les forêts sempervirentes de basse et moyenne altitude sont présentés dans la figure III.7. Notons que ce diagramme correspond aux deux horizons inférieurs illustrés sur la figure I.6, à l'exclusion du type 17 non échantillonné. Les taxons polliniques sont arrangés en fonction de leur occurrence et de leur abondance dans les différentes formations végétales.

Les formations sempervirentes de moyenne altitude ont été échantillonnées entre 700 et 1300 m d'altitude. Nous disposons de 38 spectres polliniques représentant les types floristiques 9 (type *Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta*), 10 (type *Cullenia - Mesua - Palaquium*) et 11 (type *Mesua - Palaquium*) dont la répartition géographique est donnée dans la Figure I.6. Dans la mesure où le type floristique 10 correspond aux catégories de forêts sempervirentes et sempervirentes humides, certains échantillons du type 10 ont été regroupés avec ceux du type 11 dans le diagramme pollinique (Figure III.7). Parmi ces 38 spectres, 10 proviennent cependant de bordure de forêts ou de forêts dégradées en savanes arborées.

Les types floristiques 9 et 10, (38 spectres polliniques) de la catégorie de forêts sempervirentes humides de moyenne altitude (échantillons WG83 à WG51) sont localisés entre

8° et 11°N. Ils présentent une pluie pollinique caractérisée par l'abondance des taxons arborés (AP) tels que *Mallotus**³ (en moyenne 30%), *Syzygium** (environ 20%), *Meliosma* (5%), *Aglaia*, *Cullenia exarillata*, *Ficus*, *Madhuca* et Moraceae/ Urticaceae. *Elaeocarpus*, *Gnetum ula*, *Filicium decipiens* et *Olea glandulifera* sont abondants dans quelques spectres seulement. D'autres AP, comme *Tetrameles nudiflora*, *Aporosa*, *Drypetes**, *Piper**, *Clausena**, *Trema orientalis*, *Palaquium*, *Isonandra*, *Gordonia obtusa* et *Randia** sont également représentés mais en pourcentages inférieurs à 10%.

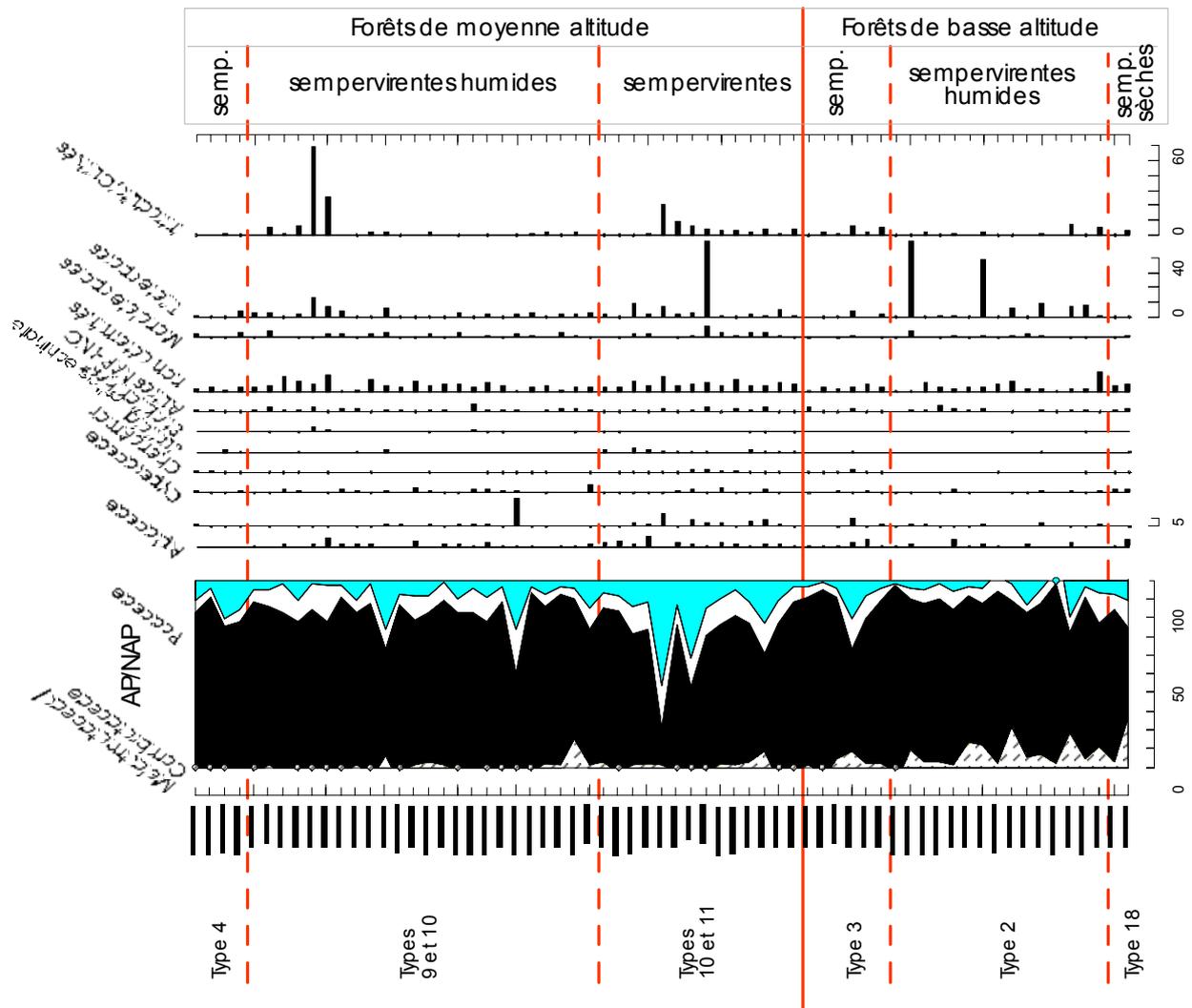
Les taxons polliniques, tels que Melastomataceae/Combretaceae, *Reinwardtiidendron anamallayanum*, *Semecarpus*, *Symplocos*, *Gomphandra*, *Dipterocarpus*, *Hopea** et *Decussocarpus* sont parfois présents, mais leur abondance est rarement supérieure à 1%. Au niveau des taxons herbacés (NAP), seules les Poaceae présentent des pourcentages atteignant parfois 20%, seulement dans les échantillons provenant de forêts dégradées.

Les types floristiques 10⁴ et 11 de la catégorie de forêts sempervirentes *sensu stricto* de moyenne altitude sont localisés entre 11° et 13°15'N (échantillons WG32 à WG12). Leur pluie pollinique est caractérisée par l'abondance relative d'*Olea dioica* (jusqu'à 20%), *Mallotus** (10%), *Syzygium** (10%). A l'instar des types sempervirents humides de moyenne altitude (types 9 et 10 décrits ci-dessus), *Meliosma*, *Aglaia**, *Cullenia exarillata* et *Ficus* sont bien représentés ; les pourcentages de Moraceae/Urticaceae et de Melastomataceae/Combretaceae restent inférieurs à 5% et *Gnetum ula* est abondant (30%) uniquement dans certains spectres. Toujours par comparaison avec les types sempervirents humides, *Celtis*, *Caryota*, *Clausena**, *Ixora**, *Glochidion**, *Lannea** et *Hopea** sont ici présents (environ 5%). Les NAP dominants sont les Apiaceae, les Compositae *échiné (5%) et les Poaceae, dont les pourcentages sont d'environ 15% dans la plupart des spectres (Figure III.7).

Le type 3 de la catégorie de forêts sempervirentes de basse altitude (échantillons WG22 à WG20, entre 11° et 13°15'N) est caractérisé par une pluie pollinique dans laquelle *Tetrameles nudiflora*, *Elaeocarpus*, *Mallotus** sont abondants (10 à 30%). D'autres taxons tels que *Schleichera oleosa*, *Clausena**, *Diospyros*, *Securinega**, *Olea dioica* et *Meliosma* sont également bien représentés. Les pourcentages des Melastomataceae/ Combretaceae et des Moraceae/ Urticaceae atteignent parfois 10%. Parmi les NAP, les Poaceae atteignent parfois 25%.

³ Les types polliniques sont marqués par *

⁴ NB : le type 10 est défini par la présence de *Cullenia* et correspond soit à du sempervirent, soit à du sempervirent humide.



Type 4 : *Dipterocarpus i.* - *Humboldtia* - *Poeciloneuron*

Type 9 : *Cullenia* - *Mesua* - *Palaquium* - *Gluta* et faciès à *Nageia*

Type 10 : *Cullenia* - *Mesua* - *Palaquium*

Type 11 : *Mesua* - *Palaquium*

Type 3 : *Dipterocarpus i.* - *Kingiodendron* - *Humboldtia*

Type 2 : *Dipterocarpus i.* - *Dipterocarpus b.* - *Strombosia*

Type 18 : *Diospyros* - *Mitreophora* - *Miliusa*

Figure III.7 : Diagramme de pourcentages des taxons polliniques pour les 65 spectres des forêts sempervirentes de basse (130-900 m) et moyenne altitude (900-1300 m). a) diagramme des AP ; b) diagramme des NC et NAP, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC.

Figure III.7 (suite) : Diagramme de pourcentages des taxons polliniques pour les 65 spectres des forêts sempervirentes de basse (130-900 m) et moyenne altitude (900-1300 m). a) diagramme des AP ; b) diagramme des NC et NAP, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC.

Le type 2, sempervirent humide de basse altitude (échantillons WG113 à WG53, entre 9° et 11°N), présente une pluie pollinique marquée par l'abondance de *Tetrameles nudiflora* (jusqu'à 70%), *Aporosa*, *Elaeocarpus*, *Mallotus** (10 à 70%), Melastomataceae/ Combretaceae (20%) et Moraceae/ Urticaceae (10%). *Drypetes*, *Schleichera oleosa*, *Toddalia asiatica**, *Meliosma*, *Aglaia* et *Ficus* sont régulièrement représentés, mais par de faibles pourcentages (<5-10%). Les Poaceae sont peu abondantes avec des pourcentages <10% en moyenne (Figure III.7).

Le type floristique 4 correspond au faciès à *Poeciloneuron*, très localisé dans la région d'Agumbe (Figure I.6) est représenté par 4 échantillons (WG159 à WG160, Figure III.7). Ces 4 spectres sont caractérisés par la très forte abondance des taxons polliniques *Poeciloneuron* (40 à 60%) et *Mallotus** (20%). D'autres taxons tels que *Piper**, *Caryota*, *Calamus**, *Aglaia* et *Gordonia obtusa* sont présents à moins de 1%. Les Poaceae ne dépassent pas 20%.

La pluie pollinique du faciès à *Nageia* du type 9 (*Cullenia* – *Mesua* – *Palaquium* – *Gluta*), localisé dans l'extrême sud de la péninsule indienne, ne présente pas de caractéristiques particulières, autres que celles du type sempervirent humide.

Le type 1 représenté par l'échantillon WG53 ne présente pas de caractéristiques particulières, différentes de celles des forêts sempervirentes humides de basse altitude. L'abondance d'*Hopea* et d'*Humboldtia* dans la végétation n'est pas traduite dans la pluie pollinique.

Le type 17, échantillonné sous le faciès à *Hopea utilis* (WG70), est caractérisé par *Tetrameles nudiflora* (20%), Melastomataceae/Combretaceae (25%), *Syzygium**, *Gnetum ula* et *Randia** (5%). Poaceae et Apiaceae sont les herbacées les mieux représentées (15% et 5%).

- Conclusion : les types floristiques définis par les botanistes ne sont pas tous documentés par le même nombre d'échantillons. Cependant le diagramme pollinique des forêts sempervirentes reflète nettement ces distinctions, ceci malgré une faible représentation de certains (e. g., type 17). Ces distinctions observables sur le diagramme ont été confirmées par des AFC effectuées sur les seuls spectres de la figure III.7. La dispersion des spectres sépare nettement ces quatre groupes : 1) sempervirent humide de basse altitude, 2) sempervirent humide de moyenne altitude, 3) sempervirent de basse altitude, et 4) sempervirent de moyenne altitude. On a donc une bonne reproduction pollinique de la classification botanique.

- **Forêts semi-sempervirentes (Figure III.8)**

Les formations semi-sempervirentes (types 6 et 7, fig.I.6) qui sont localisées au nord de 13°15'N, ont été échantillonnées entre 90 et 780 m d'altitude. Nous disposons de 27 spectres pour caractériser ce type de formation. Dans le diagramme pollinique, ils ont été arrangés de bas en haut en fonction d'une altitude croissante.

On remarque que la pluie pollinique des formations semi-sempervirentes d'altitude inférieure à 500 m (échantillons WG154 à WG189) est caractérisée par l'abondance des AP tels que *Schleichera oleosa* (jusqu'à 40%), *Tetrameles nudiflora* (10%), *Mallotus** (10%), *Aporosa* (jusqu'à 30%), *Syzygium** (jusqu'à 40%), *Gnetum ula* (jusqu'à 40%) et les Melastomataceae/ Combretaceae (jusqu'à 30%). D'autres taxons, tels que *Holigarna*, *Xylia xylocarpa*, *Lagerstroemia* et *Ixora** sont également bien représentés avec des pourcentages d'environ 5%. Parmi les NAP, les Poaceae représentent en moyenne 5%.

Lorsque l'altitude est comprise entre 500 et 780 m (échantillons WG190 à WG149), les taxons tels que *Schleichera oleosa*, *Lagerstroemia*, *Tetrameles nudiflora* et *Mallotus** sont moins abondants. A cette altitude, la pluie pollinique des formations semi-sempervirentes est plutôt caractérisée par l'abondance de *Aporosa* (20%), *Syzygium** (20%), *Gnetum ula*, *Olea dioica*, Melastomataceae/ Combretaceae (jusqu'à 50%) et la présence notable de *Caryota**, *Glochidion**, *Aglaia* et *Celtis*. Les Poaceae sont beaucoup plus abondantes à cette altitude, avec une moyenne de 15% environ.

- Conclusion : on n'a pas trouvé de signal particulier dans la composition pollinique qui permette de distinguer palynologiquement les types 6 et 7. Cet aspect est discuté dans la publication n° 3, où l'on présente les analyses factorielles correspondantes. La distribution des spectres polliniques des seuls types semi-sempervirents selon un gradient d'altitude de la figure III.8 reconferme une séparation à 500 m, laquelle correspond à la valeur 23°C de MTCO.

- **Formations secondaires (Figure III.9)**

Les formations secondaires dérivent des forêts sempervirentes dégradées (Pascal, 1988). Elles ont été échantillonnées entre 100 et 1000 m d'altitude du sud au nord des Ghâts. Dans le diagramme pollinique présenté nous avons choisi d'arranger les spectres en fonction de la physionomie de la formation échantillonnée (forêt ou savane) et du type de forêt primaire dégradée (forêt sempervirente ou forêt semi-sempervirente), selon les groupes qui sont apparus après l'AFC correspondante.

La pluie pollinique des forêts secondaires, résultant de la dégradation de forêts **sempervirentes** (échantillons WG24A à WG7), est caractérisée par l'abondance des AP *Mallotus** (20%), *Elaeocarpus* (10%), *Gnetum ula*, *Syzygium**, *Meliosma*, l'absence des Melastomataceae/ Combretaceae et la présence d'autres AP tels que *Maytenus**, *Ficus*, *Clausena**, *Ixora**, *Chrysophyllum lanceolatum* et *Hopea** sous de faibles proportions. Les pourcentages de taxons herbacés, surtout représentés par les graminées sont inférieurs à 10%. Lorsque le stade de dégradation de la forêt primaire sempervirente conduit à la savane arborée (échantillons WG125 à WG29), *Mallotus** (10%) et *Syzygium** (5%) présentent alors une proportion plus faible, tandis que les pourcentages de Melastomataceae/ Combretaceae sont en moyenne de 40%. D'autres AP tels que *Trema orientalis*, *Tetrameles nudiflora*, *Schleichera oleosa* et *Lannea** sont aussi plus fortement représentés dans les spectres polliniques, tout comme les Poaceae dont les proportions atteignent parfois 25% (Figure III.9).

La pluie pollinique des forêts secondaires résultant de la dégradation de forêts **semi-sempervirentes** (échantillons WG165 à WG195), est marquée par la présence d'AP tels que *Schleichera oleosa*, *Aporosa*, *Lagerstroemia*, *Glochidion**, *Syzygium**, *Olea dioica*, *Neonauclea** (qui représente ici *Haldina*) et les Melastomataceae/ Combretaceae (jusqu'à 50%).

La proportion des Poaceae atteint parfois 40%. Les savanes arborées résultant de la dégradation de forêts semi-sempervirentes (échantillons WG124A à WG141), présentent une pluie pollinique dans laquelle *Aporosa* et parfois *Schleichera oleosa*, *Aglaia*, *Lannea** sont abondants. Les Melastomataceae/ Combretaceae représentent en moyenne 20% et les Poaceae parfois plus de 50% (Figure III.9).

- Conclusion : La pluie pollinique des forêts sempervirentes dégradées en forêts secondaires ou en savanes arborées ne présente pas les mêmes caractéristiques que celles des forêts secondaires résultant de la dégradation des forêts semi-sempervirentes. On peut dire que la pluie pollinique reproduit le caractère sempervirent ou semi-sempervirent de la végétation malgré la dégradation. Nous n'avons pas pu extraire d'indicateurs de la dégradation, indépendant de la végétation initiale.

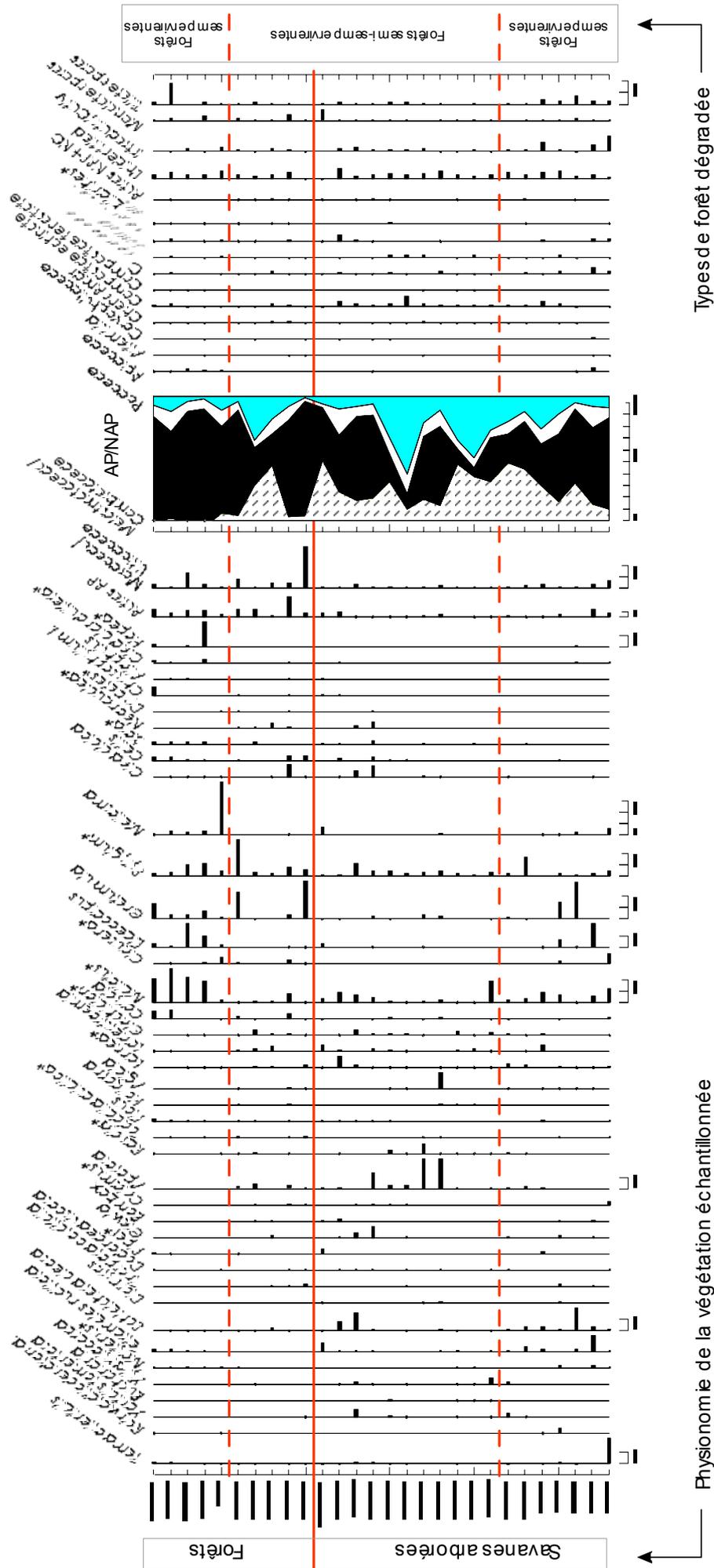


Figure III.9: Diagramme de pourcentages des taxons polliniques AP, NAP et NC, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC, pour les 28 spectres des formations secondaires.

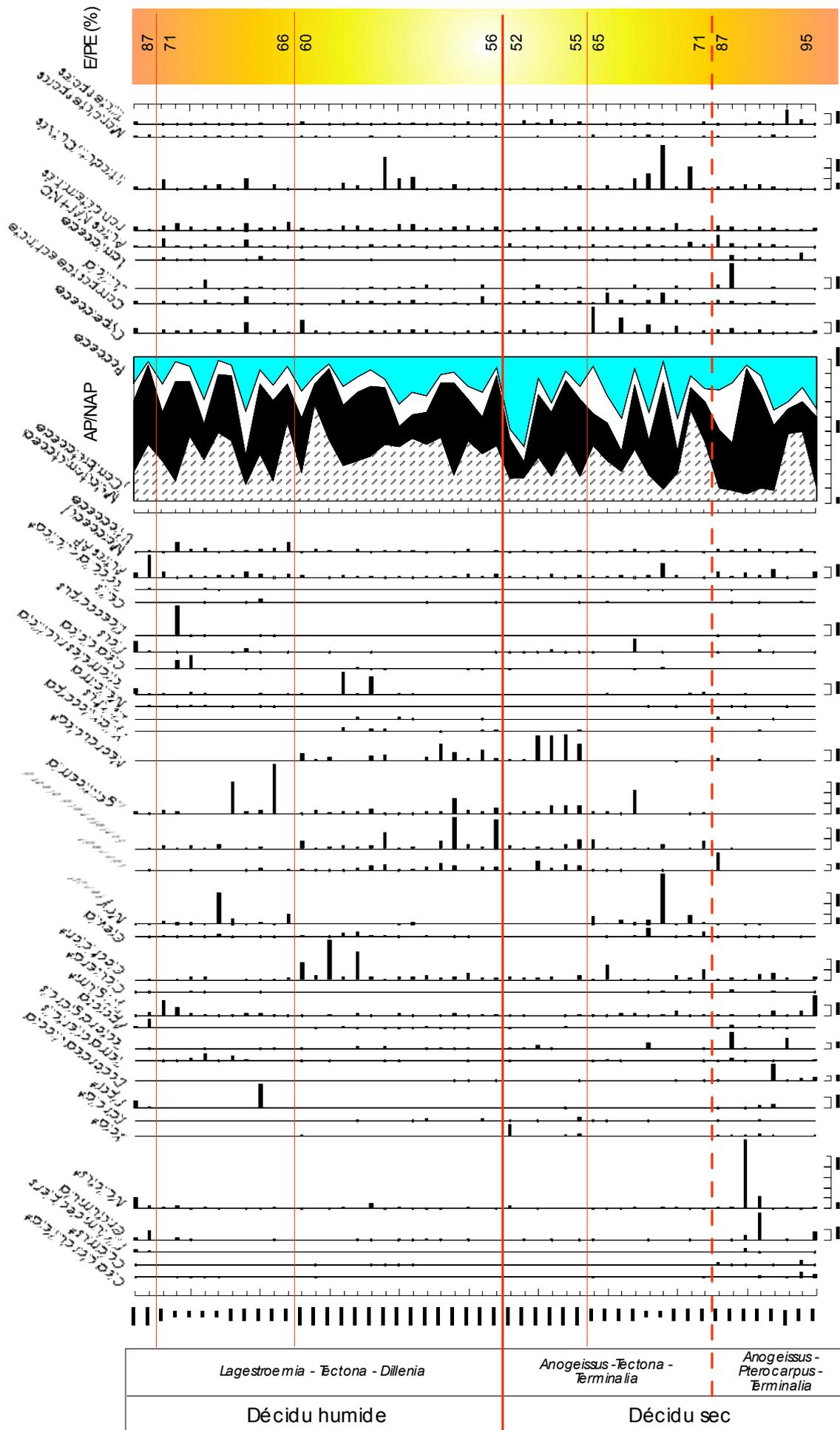
- **Formations décidues (Figure III.10)**

Les échantillons de sol collectés dans les formations décidues humides et décidues sèches sont indiqués sur la figure I.7. Les spectres ont été arrangés en fonction des types floristiques définis par les botanistes et listés à gauche du diagramme. Quand on calcule pour chaque spectre les valeurs de E/PE aux sites correspondants, on s'aperçoit qu'il n'y a pas superposition du caractère humide/sec et du gradient du coefficient d'humidité (tel que défini par (Prentice *et al.*, 1992). Nous avons donc présenté les spectres selon les valeurs de E/PE, décroissantes de bas en haut pour les décidus secs et de haut en bas pour les décidus humides. En effet on a ainsi en contact les spectres polliniques correspondant à des valeurs semblables autour de 52-56 %.

Les formations **décidues humides** correspondent au type floristique *Lagerstroemia- Tectona – Dillenia*. Nous disposons de 27 spectres représentant ce type floristique qui s'étale du sud au nord des Ghâts (échantillons WG122 à WG168) sous des valeurs du coefficient d'humidité E/PE, comprises entre 66% et 87%.

Les forêts décidues humides, soumises à un faible stress hydrique (coefficient d'humidité E/PE de 87%) présentent une pluie pollinique caractérisée par les taxons *Gnetum ula*, *Mallotus**, *Piper**, *Aporosa*, *Tetrameles nudiflora*, *Ficus* (5 à 10%) et les Melastomataceae/Combretaceae qui représentent jusqu'à 50% (échantillons WG122 et WG121). Les forêts décidues humides soumises à un plus fort stress hydrique (coefficient d'humidité E/PE compris entre 71% et 66%) (échantillons WG54 à WG41), présentent une pluie pollinique marquée également par de fortes proportions de Melastomataceae/Combretaceae (jusqu'à 60%), mais où d'autres taxons comme *Piper**, *Trema orientalis*, *Syzygium**, *Maytenus**, *Lagerstroemia*, *Olea dioica* et *Elaeocarpus* sont parfois abondants, avec des pourcentages supérieurs à 10%. Les taxons représentés par de faibles pourcentages sont *Grewia*, *Schleichera oleosa* et *Mallotus**. Les forêts décidues humides subissant un stress hydrique encore plus important (coefficient d'humidité E/PE compris entre 60% et 56%) (échantillons WG197 à WG168), sont caractérisées par de forts pourcentages de *Glochidion** (5 à 35%), *Lannea** (5%), *Schleichera oleosa* (jusqu'à 30%), *Neonauclea** (5 à 15%), Melastomataceae/ Combretaceae (jusqu'à 70%) et par la présence régulière de *Grewia*, *Lagerstroemia* et parfois *Xylia xylocarpa*.

Les formations **décidues sèches** correspondent à deux types floristiques : le type *Anogeissus -Tectona –Terminalia* présent sur le Plateau de Mysore, et le type *Anogeissus -Pterocarpus – Terminalia* dont la localisation est restreinte à la région de Tirunelveli, dans l'extrême sud de la péninsule indienne (Ramesh *et al.*, 1998). Les valeurs du coefficient d'humidité E/PE calculé aux 15 sites correspondant au type *Anogeissus -Tectona –Terminalia* sont comprises entre 52% et 71%. Elles sont beaucoup plus élevées (stress hydrique moins important) pour les 6 sites de la pointe sud de l'Inde (valeurs comprises entre 87% et 95%) (Figure III.10).



Dans le diagramme, l'arrangement des spectres en fonction des valeurs de E/PE met en évidence que les formations décidues sèches du **type *Anogeissus -Tectona -Terminalia*** présentent deux sortes de pluies polliniques différentes. En effet, lorsque E/PE est compris entre 52% et 55% (échantillons WG179 à WG169), la pluie pollinique est caractérisée par l'abondance de *Lannea**, *Lagerstroemia* et *Neonauclea** et par la présence sous de faibles proportions des taxons *Glochidion** et *Ficus*. Lorsque E/PE est compris entre 65% et 71% (échantillons WG40 à WG55), la pluie pollinique est alors marquée par l'abondance des AP *Glochidion**, *Grewia*, *Maytenus** et des NAP Poaceae et Compositae *échiné. Dans les deux cas, les Melastomataceae/ Combretaceae sont représentées par de fortes proportions (environ 20%).

La pluie pollinique du **type *Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia***, soumis à un très faible stress hydrique ($87\% < E/PE < 95\%$) (échantillons WG58 à WG91) est caractérisée par l'abondance et la bonne représentation des AP *Olea glandulifera*, *Calamus**, *Filicium decipiens*, *Gnetum ula*, *Mallotus**, *Piper**, *Trema orientalis*, *Tectona grandis*, *Aporosa*, *Syzygium**, *Glochidion** et Moraceae/Urticaceae. Les proportions de Melastomataceae/Combretaceae sont de 20% en moyenne.

- Conclusion : sous des valeurs de stress hydrique du même ordre de grandeur, on trouve des spectres polliniques de composition proche à la fois dans les formations décidues sèches et humides. Par exemple sous $E/PE > 87\%$, les spectres contiennent *Mallotus**, *Piper**, *Gnetum ula*. Pour E/PE autour de 52-56 %, les spectres sont caractérisés par *Lannea**, *Schleichera oleosa*, *Neonauclea**, *Lagerstroemia*. L'absence de distinction palynologique générale entre décidus humides et décidus secs, est par ailleurs signalée dans les analyses polliniques des Ghâts orientaux (Anupama *et al.*, 2000). Les types floristiques distingués par les études botaniques se retrouvent dans la pluie pollinique avec y compris des distinctions supplémentaires. Cependant la séparation entre décidu sec et décidu humide ne correspond pas à des intervalles de valeurs respectivement élevées ou faibles du stress hydrique subit par les plantes. C'est sans doute parce que la distinction botanique a surtout tenu compte des valeurs de précipitation annuelle.

← Figure III.10: Diagramme de pourcentages des taxons polliniques AP, NAP et NC, ainsi que diagramme synthétique représentant le total des AP (Melastomataceae/ Combretaceae et Moraceae/ Urticaceae inclus dans les AP) versus NAP+NC, pour les 50 spectres des forêts décidues sèches et humides des Ghâts occidentaux.

Les résultats présentés dans le chapitre sur la pluie pollinique et la végétation montrent que chaque type floristique cartographiés en Inde du Sud présente une pluie pollinique de composition différente et significative. Toutefois les distinctions sont mieux reproduites pour les formations sempervirentes que pour les formations décidues. Cependant comme les formations décidues sont celles qui ont été le plus longtemps soumises à l'action de l'homme, on pourrait supposer que cela a entraîné des biais dans la composition pollinique. Il n'en reste pas moins vrai que la classification botanique en vigueur ne correspond pas à un gradient des valeurs de stress hydrique pour les formations décidues. Mais on n'a pas non plus identifié de marqueur indépendant de l'action anthropique.

Les relations taxonomiques entre la pluie pollinique actuelle et la végétation des Ghâts occidentaux ont été largement discutées dans les articles publiés. Nous rappellerons cependant les biais majeurs existants dans la pluie pollinique des forêts tropicales. Dans les parties suivantes, il nous a paru intéressant de dégager les caractéristiques relatives à la richesse floristique, à la densité du couvert arboré, en considérant les résultats de l'ensemble des 180 échantillons.

2.2. Caractéristiques de la pluie pollinique

- **Biais de la pluie pollinique tropicale**

Les forêts tropicales en Asie sont caractérisées par l'abondance des Dipterocarpaceae (e.g. Ashton, 1964; Whitmore, 1975). Les représentants de cette famille botanique sont majoritaires dans les forêts sempervirentes de plaine et de basse altitude (types floristiques 1 à 6 de la Figure I.6) de l'Inde du sud et dans les Sal forests de l'Inde centrale. L'Importance Value Index (IVI), facteur calculé par la méthode de (Cain *et al.*, 1956), qui intègre à la fois la fréquence, l'importance et la taille d'un taxon botanique, a été calculé pour les forêts que nous avons échantillonnées et est compris entre 40 et 73 pour les Dipterocarpaceae (Pascal, 1988). Parmi les Dipterocarpaceae, les espèces de *Dipterocarpus*, *Hopea* et *Vateria* sont les mieux représentées en Inde du sud. Dans la pluie pollinique actuelle de ces forêts, les pollens de *Dipterocarpus* n'ont été retrouvés qu'occasionnellement. *Hopea* et *Vateria* (*Vateria* inclus dans le type pollinique *Hopea*) ont été retrouvés, mais toujours sous de faibles proportions, n'excédant pas 2%. La faible représentation des Dipterocarpaceae est un fait qui a déjà été remarqué dans la pluie pollinique actuelle des Sal Forests de l'Inde centrale (Chauhan, 1994) et qui peut s'expliquer par le mode de pollinisation entomophile (Watson and Dallwitz, 1992).

Une autre caractéristique des forêts de basse altitude des Ghâts occidentaux est l'importance des Ebenaceae, surtout dans les types floristiques localisés dans la région nord des Ghâts (types 6 et 7 de la figure I.6). Cette famille est essentiellement représentée par les espèces de *Diospyros*, dont bon nombre d'entre elles sont endémiques à la région (Pascal, 1988; Ramesh and Pascal, 1997). Du sud au nord, *Diospyros* remplace progressivement les Dipterocarpaceae, lorsque la longueur de la saison sèche excède 5 mois. En effet, les valeurs des IVI calculées passent de 3 pour les forêts du sud, à plus de 100 dans les forêts semi-sempervirentes au nord de 13°N (Pascal, 1988). Dans les spectres polliniques présentés ici, *Diospyros* est représenté mais toujours sous de faibles proportions (< 2%). Cependant, en accord avec les observations botaniques, son occurrence est plus fréquente dans les spectres au nord de 13°N.

Les forêts sempervirentes des Ghâts occidentaux sont également caractérisées par les Lauraceae, une famille botanique qui devient surtout abondante au-delà de 850 d'altitude (Ganesh *et al.*, 1996; Pascal, 1988). Les Lauraceae, représentées par les espèces de *Cinnamomum*, *Actinodaphne*, *Litsea*, *Neolitsea* et *Persea* entre autres, ne sont pas du tout retrouvées dans la pluie pollinique des forêts de l'Inde du Sud. Ceci tient au fait que leurs pollens sont constitués par une exine beaucoup trop fine et donc peu résistante à la conservation dans les sols et encore moins au traitement chimique de l'acétolyse (Raj and Van der Werff, 1988; Rowley and Vasanthy, 1993; Van der Merwe *et al.*, 1990). Il en va de même pour les Annonaceae, dont certains représentants comme *Polyalthia* et *Meiogyne* sont très abondants dans les forêts sempervirentes de basse et moyenne altitude. Les pollens trop fins pour être préservés, ne sont jamais retrouvés dans la pluie pollinique.

Une autre caractéristique des forêts sempervirentes de moyenne altitude des Ghâts occidentaux est l'abondance de *Cullenia exarillata* (Bombacaceae) et de *Palaquium ellipticum* (Sapotaceae) (Pascal, 1988 ; Ganesh *et al.*, 1996). Les pollens de ces deux taxons sont bien enregistrés dans la plupart des spectres des forêts de moyenne altitude (types floristiques 9 et 10 de la Figure I.6), mais sous de faibles pourcentages (entre 0 et 15% pour *Cullenia* et entre 0 et 5% pour *Palaquium*). Aucune étude n'a été menée pour tenter d'expliquer ce fait, mais on suppose qu'une faible production et/ou un mode de pollinisation de type entomophile pourrait expliquer la sous-représentation de ces deux importants éléments des forêts sempervirentes de moyenne altitude.

D'autres taxons caractéristiques des types floristiques définis par les botanistes, tels que *Kingiodendron*, *Humboldtia* (Caesalpinaceae), *Strombosia* (Olacaceae), *Dysoxylum* (Meliaceae), *Mesua* (Clusiaceae), bien qu'étant abondants dans les forêts sempervirentes sont

rarement retrouvés dans la pluie pollinique (proportion < 1%). Il est par contre remarquable, que les taxons polliniques retrouvés sous les plus forts pourcentages et dans un grand nombre de spectres, tels que *Mallotus**, *Elaeocarpus*, *Tetrameles nudiflora*, *Schleichera oleosa*, *Aporosa* représentent des arbres émergents ou arbustes qui sont des espèces de lumière, se développant particulièrement bien dans les trouées naturelles des forêts sempervirentes (Pascal, 1988). On suppose que la sur-représentation de ces espèces héliophiles, qui sont des espèces pionnières lors d'une re-colonisation forestière, utilisent des processus de pollinisation efficaces, telle qu'une forte production de grains et un mode de dispersion anémophile, pour optimiser leur extension spatiale.

Les espèces d'arbres les plus typiques des forêts de l'Inde du sud ne sont pas présentes dans la pluie pollinique actuelle. Cependant, malgré ces distorsions, les spectres polliniques montrent cependant des différences de composition notables selon les types de végétations échantillonnés. Dans les paragraphes suivants nous allons voir comment les types de végétation, définis par les botanistes sur la base des aires de distribution de certaines espèces endémiques, pourraient être caractérisés par certains taxons ou associations de taxons polliniques. Nous verrons également comment les différents attributs physiologiques des forêts des Ghâts sont exprimés dans la pluie pollinique actuelle.

- **Richesse taxonomique et richesse floristique**

Les 186 taxons polliniques contenus dans les 180 spectres actuels sont loin de représenter les 3500 espèces répertoriées pour les forêts des Ghâts occidentaux (Khoshoo, 1995; Nair and Daniels, 1986). Parmi eux, 78% représentent des arbres ou arbustes (AP) et seulement 13% représentent des plantes herbacées (NAP). Dans la région des Ghâts orientaux, où les forêts semi-sempervirentes et décidues dominent (Pascal and Ramesh, 1995), parmi les 122 taxons identifiés, 75% des taxons polliniques identifiés sont attribués à des arbres alors que 18% représentent des herbes (Anupama *et al.*, 2000). A la même latitude, mais en Afrique de l'ouest, parmi les 167 taxons identifiés, 48% seulement représentent des arbres et 28% des herbes (Vincens *et al.*, 1997). La pluie pollinique actuelle des forêts de l'Ethiopie de l'est présente une proportion d'AP encore inférieure, avec 50% pour 192 taxons identifiés (Bonnefille *et al.*, 1993). La forte proportion des AP (78%) dans notre liste de taxons reflète la prépondérance des arbres et leur plus grande diversité par rapport aux herbes dans la région tropicale humide des Ghâts occidentaux. Cependant, il faut noter que de nombreuses herbes sont identifiées au niveau de la famille seulement, ce qui tend donc à réduire l'effectif des taxons NAP dans notre liste.

La richesse spécifique d'un type de végétation dépend de la taille de la parcelle étudiée. Plus la parcelle est grande, plus le nombre d'espèces est important, jusqu'à une certaine limite (Arrhenius, 1921; Gleason, 1922). Il en va de même lors de l'analyse pollinique. Plus le nombre de grains comptés est grand, plus le nombre de taxons identifiés est important. Nous avons donc construit une courbe qui correspond au nombre de grains comptés en fonction du nombre de taxons identifiés. Etablie lors de chaque comptage, cette courbe a permis d'apprécier le comptage minimum de grains nécessaires pour obtenir des spectres représentatifs de la diversité taxonomique de la pluie pollinique. Les différents graphiques présentés en annexe II.3, montrent qu'il a été nécessaire de compter un minimum de 300 grains de pollens, quel que soit le type de formation végétale échantillonnée.

Chaque comptage ayant été poussé jusqu'à obtenir le niveau de « saturation » (i.e. un nombre de taxons identifiés stable, malgré une augmentation du nombre de grains comptés), on considère qu'une comparaison du nombre de taxons entre les divers types de végétation est donc informative, bien qu'une plus grande rigueur exigerait cependant d'appliquer une méthode de raréfaction, telle celle développée par (Sanders, 1968) (améliorée par (Hurlbert, 1971) et récemment appliquée à l'analyse de la richesse palynologique des sédiments quaternaires par (Birks and Line, 1992).

Nous avons choisi de comparer le nombre de taxons arborés (AP) mieux discriminés « palynologiquement » que les pollens des plantes herbacées. Le graphique de la figure III.11 représente la tendance centrale (médiane) et l'étendue statistique (quartiles et valeurs minimales et maximales) du nombre de taxons AP identifiés pour chaque catégorie de végétation.

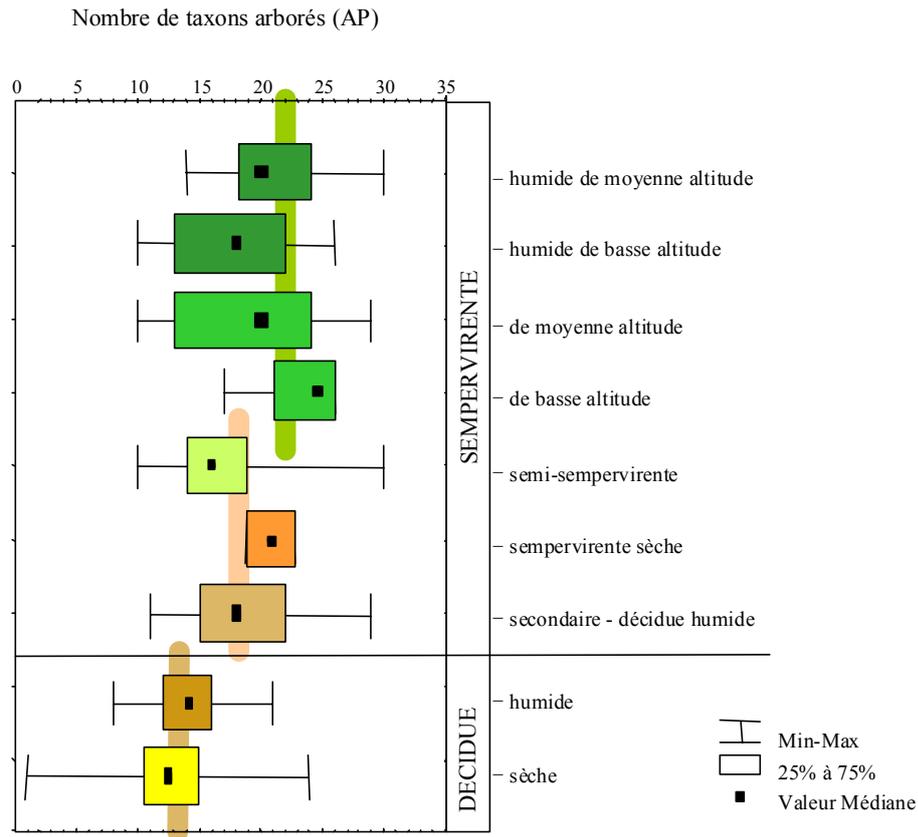


Figure III.11 : Richesse en taxons arborés de la pluie pollinique pour les différents types de formations échantillonnées dans les Ghâts occidentaux.

Cette représentation graphique montre que la pluie pollinique des forêts sempervirentes (humides ou sèches) présentent une plus grande richesse en taxons arborés (nombre d'AP > 20) que les formations semi-sempervirentes et secondaires (nombre d'AP compris entre 15 et 20) et que les formations décidues sèches et humides (nombre d'AP < 15).

La plus grande richesse taxonomique de la pluie pollinique des forêts sempervirentes par rapport à celle des forêts décidues est en accord avec les observations menées par les botanistes (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1988; Sundarapandian and Swamt, 1997). En effet, Pascal (1988) a montré par l'étude d'une dizaine de parcelles forestières d'une surface de 1000 m², que les forêts sempervirentes à basse et moyenne altitude totalisent entre 25 et 30 espèces, tandis que les forêts décidues en comptent entre 8 et 12 (plantes de circonférence ≥ 10 cm). La richesse spécifique d'un type pouvant grandement varier d'un site à l'autre, on préférera plutôt comparer les résultats sur la pluie pollinique avec les données de Ghate et Collaborateurs (1998) qui ont mené une étude floristique sur un plus grand nombre de parcelles dans les forêts sempervirentes

et décidues des Ghâts (108 parcelles d'environ 1000 m², distribuées entre 8° et 21°N). Entre autre, cette étude a montré qu'en moyenne la richesse spécifique est de 38 à 48 espèces dans les forêts sempervirentes et seulement de 27 dans les forêts décidues (Ghate *et al.*, 1998). Dans la mesure où les taxons polliniques représentent en général plutôt des genres que des espèces, on peut dire que qualitativement, la pluie pollinique reflète bien la plus grande richesse des forêts sempervirentes par comparaison avec les forêts décidues. Il faut cependant noter que le nombre de taxons arborés représentés dans la pluie pollinique des forêts décidues serait accru si les Combretaceae, tels que *Terminalia* et *Anogeissus* pouvaient être distingués palynologiquement.

Les forêts secondaires qui totalisent jusqu'à plus de 40 espèces d'arbres, ont des diversités floristiques plus importantes que les forêts climaciques du fait de la présence à la fois d'espèces de lumière qui abondent lors du développement initial de la forêt secondaire et d'espèces sciaphiles qui progressivement re-colonisent le milieu (Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1988). La richesse taxonomique de la pluie pollinique de ce type de formation est en effet proche de celle des formations sempervirentes climaciques, mais présente une dispersion plus grande, qui pourrait traduire l'évolution de la richesse de ces forêts secondaires en fonction de leur stade de développement.

Il est intéressant de remarquer notamment, qu'un échantillonnage de la pluie pollinique qui se fait sur une surface d'environ 500 m², produit un nombre de taxons polliniques AP proche de celui d'un relevé botanique effectué pour des arbres et arbustes de circonférence ≥ 10 cm dans une parcelle de 1000 m². Pour les forêts sempervirentes, le nombre d'espèces augmente largement lorsque les relevés botaniques sont effectués dans des parcelles de 1600m² (Pascal, 1988). L'analyse par la méthode de raréfaction de 191 relevés botaniques entre 8° et 12°N dans les différents types floristiques sempervirents *sensu lato* des Ghâts, met en évidence une diminution de la richesse en endémiques avec l'augmentation de la longueur de la saison sèche, tandis qu'au sein des types sempervirents humides, les types à moyenne altitude (800 –1400 m) sont plus riches en espèces endémiques que les types à basse altitude (Gimaret-Carpentier, 1999). L'étude palynologique ne permet pas de distinguer les espèces endémiques des autres. Une diminution de la richesse floristique peut être appréhendée dans le graphique de la Figure III.11. En effet, celui-ci montre que les forêts semi-sempervirentes qui subissent une saison sèche supérieure à 5 mois sont en effet caractérisées par un nombre d'AP inférieur à celui des forêts sempervirentes (saison sèche inférieure à 5 mois). Une tendance vers une moindre richesse floristique en fonction de la longueur de la saison sèche semble être mise en évidence dans la pluie pollinique arborée. La pluie pollinique des forêts à moyenne altitude n'est pas caractérisée par un plus grand nombre de pollens arborés que celle des forêts de basse altitude.

- **Proportion des AP et densité du couvert arboré**

Il est également intéressant de comparer les proportions des pollens d'arbres (AP) qui existent entre les types de formations. Les diagrammes synthétiques (pourcentages d'AP *versus* pourcentages de NAP+NC) présentés dans les diagrammes polliniques (Figures III.7, III.8, III.9 et III.10) montrent que le pourcentage de taxons AP varie d'un type de formation à l'autre, et peut aussi être très variable au sein d'un même type de végétation. En effet, si l'on calcule les proportions moyennes des AP et les intervalles de confiances associés, on constate que la pluie pollinique des forêts sempervirentes et sempervirentes humides (à basse et moyenne altitude) est caractérisée par 55% à 82% d'AP, tandis que la pluie pollinique des formations décidues est caractérisée par une proportion moyenne d'AP inférieure, comprise entre 28% et 44% (Figure III.12).

Les pluies polliniques des forêts semi-sempervirentes et des formations secondaires présentent des proportions d'AP intermédiaires avec des moyennes de 48% et 42% respectivement. La pluie pollinique des forêts sempervirentes sèches, représentée uniquement par deux spectres, produit une moyenne d'AP similaire à celle des forêts sempervirentes et sempervirentes humides.

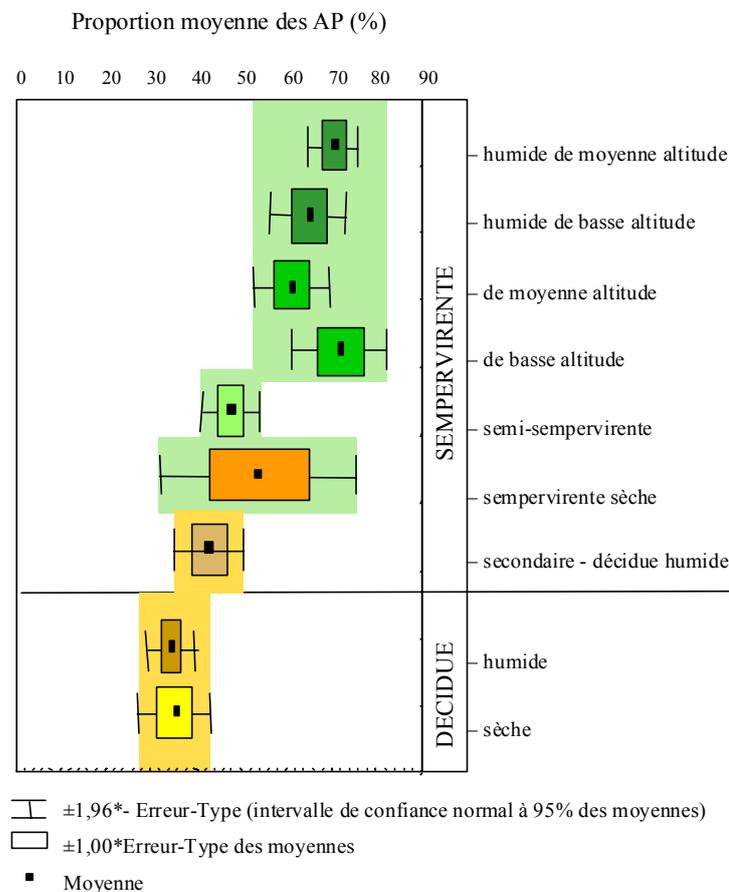


Figure III.12 : Proportion moyenne des taxons arborés (AP, %) en fonction des types de formations. Ici, les taxons Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae ne sont pas considérés.

La proportion de taxons arborés (AP) dans la pluie pollinique reflète bien nos observations de terrain : les formations sempervirentes présentent une proportion d'arbres au mètre carré supérieure aux formations décidues, dans lesquelles les herbes et notamment les graminées sont toujours présentes dans la strate inférieure. Ces résultats reflètent aussi les observations et estimations des botanistes, qui ont montré que la densité d'arbres par hectare passe de *ca.* 400 arbres/ha dans les forêts sempervirentes, à *ca.* 300/ha dans les forêts semi-sempervirentes et *ca.* 250 arbres/ha dans les forêts décidues (Ghate *et al.*, 1998). La diminution des taxons arborés dans la pluie pollinique reproduit la diminution de densité d'arbres par hectare dans des proportions assez semblables à la réalité terrain. En général, on remarquera que de forts pourcentages d'AP caractérisent les forêts sempervirentes tropicales à la fois de l'Inde (Bera and Gupta, 1992; Gupta and Bera, 1996), de l'Afrique (Vincens *et al.*, 1997) et de l'Amérique du sud (Rodgers III and Horn, 1996). En effet, un pourcentage d'AP >50% distingue les forêts sempervirentes des forêts décidues pour lesquelles les AP ne représentent que 25% à 50% (Anupama *et al.*, 2000; Bonnefille *et al.*, 1993; Chauhan, 1994; Gupta and Yadav, 1992; Vincens *et al.*, 1997).

Les types de végétation sempervirents et décidus présentent des physionomies variables. La plupart des formations sempervirentes sont plutôt représentées par des forêts, tandis que les formations décidues se trouvent aussi bien sous la forme de forêts que de savanes plus ou moins arborées. Les forêts sempervirentes fortement perturbées par l'action anthropique sont dégradées en fourrés (denses ou discontinu). Il apparaît donc intéressant de comparer les proportions moyennes des taxons polliniques représentant les arbres et arbustes (AP) avec celles des plantes herbacées (NAP) et des Poaceae, en fonction de la physionomie des végétations échantillonnées. Pour ce faire, nous avons adopté la même représentation graphique que pour la figure précédente, qui donne les moyennes et les intervalles de confiance à 95% des moyennes (Figure III.13). Sur ces graphiques, nous avons également représenté les valeurs obtenues pour les quelques échantillons test prélevés en bordure de forêt et dans une bambouseraie à *Ochlandra*.

Ces graphiques mettent en évidence que la proportion des taxons herbacés (NAP et Poaceae) représentés dans la pluie pollinique croît largement lorsque la physionomie de la végétation échantillonnée passe de la forêt dense à la savane. La pluie pollinique des forêts (forêts sempervirentes et décidues confondues) et des forêts denses est caractérisée par de très faibles proportions de NAP (*ca.* 5%) et de Poaceae (<10%). Au contraire, les formations ouvertes comme les fourrés et les savanes arborées et/ ou arbustives montrent des proportions de NAP et de Poaceae élevées (Figure III.13).

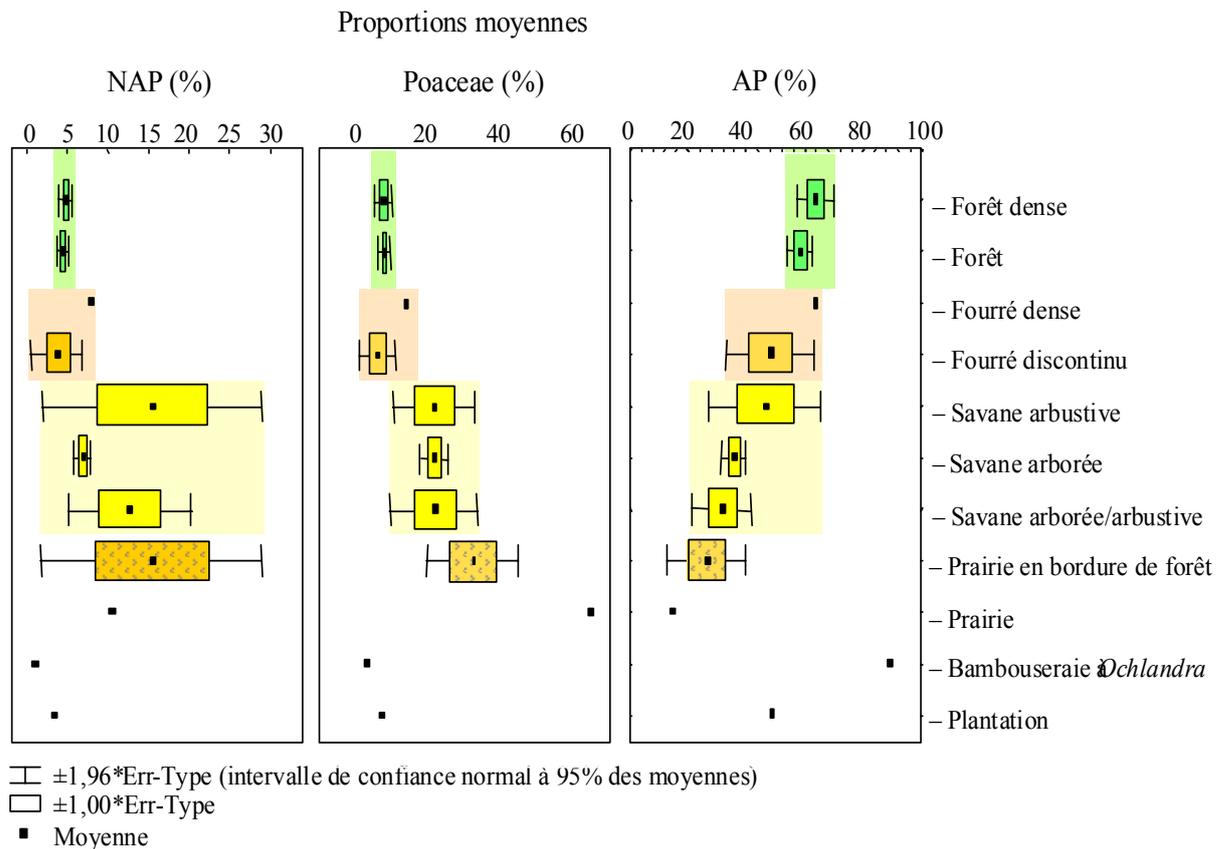


Figure III.13 : Proportion moyenne des pollens de plantes herbacées (NAP), des Poaceae et des arbres et arbustes (AP, Melastomataceae/Combretaceae et Moraceae/Urticaceae exclus), en fonction de la physionomie de la formation végétale échantillonnée.

Dans la mesure où les pourcentages de NAP varient grandement autour de la moyenne, on préférera considérer les proportions des Poaceae, conjointement à celles des AP, pour caractériser l'ouverture d'un milieu. Ainsi, la pluie pollinique des milieux fermés comme les forêts est caractérisée par des proportions d'AP supérieures à 50% et des pourcentages de Poaceae inférieurs à 10%. La pluie pollinique des milieux ouverts de type savane arborée et/ou arbustive est caractérisée par moins de 50% de taxons arborés (AP) et jusqu'à 30% de Poaceae. Lorsque le milieu est dépourvu d'arbres (prairie), la proportion de Poaceae dans la pluie pollinique dépasse 60%. Nos résultats sont similaires à ceux obtenus pour la pluie pollinique des savanes arborées décidues sèches et des forêts sempervirentes des Biligirirangan (Ghâts orientaux) (Anupama *et al.*, 2000) et de l'Inde centrale (Chauhan, 1994). Il semble que ces valeurs seuils d'AP = 50% et de Poaceae = 30% soient un bon critère pour distinguer les milieux ouverts des milieux fermés. Ces valeurs semblent être applicables non seulement aux végétations tropicales de l'Inde mais aussi de Afrique, où l'on retrouve les mêmes seuils pour discriminer forêt et savane (Vincens *et al.*, 2000)

Il est surprenant cependant de constater que le spectre obtenu à partir d'un échantillon de sol collecté dans une bamboueraie montre une proportion de Poaceae inférieure à 5%, bien que les bambous appartiennent à la famille des Poaceae. La non-représentation des bambous dans la pluie pollinique peut s'expliquer par le fait que la floraison des bambous ne survient que très rarement (environ 1 fois tous les 50 ans) (Watson and Dallwitz, 1992). Le fort pourcentage d'AP représentés dans la pluie pollinique de cette bamboueraie semble plutôt traduire la présence d'arbres aux alentours. Notons également que les spectres polliniques obtenus à partir d'échantillons collectés dans les prairies en bordure de forêts présentent une forte proportion de Poaceae (30% en moyenne) et de NAP, n'indiquant pas particulièrement la présence d'une forêt alentours. Ce résultat indique que pour obtenir la signature pollinique des forêts il est nécessaire de collecter l'échantillon de sol à l'intérieur de la forêt, sous la canopée.

Les ouvertures naturelles de la canopée dans les forêts tropicales sempervirentes occasionnent le développement de lianes. La présence de lianes est enregistrée dans la pluie pollinique actuelle où les proportions de *Gnetum ula* sont de 6% en moyenne dans les forêts sempervirentes, 12% dans les forêts semi-sempervirentes et < 2% dans les forêts décidues. Les pourcentages de *Gnetum ula* atteignent parfois 50% lorsque l'échantillon a été collecté en bordure de forêt. En effet, des lianes telles que *Gnetum ula* sont particulièrement abondantes dans les chablis et en lisière de forêt (Arora, 1965; Arora, 1966; Ghate *et al.*, 1998; Pascal, 1986; Pascal, 1988).

En accord avec nos observations de terrain, la pluie pollinique actuelle reflète bien la physionomie de la végétation. Le rapport entre les proportions d'AP et de Poaceae permet de discriminer les milieux ouverts des milieux fermés et l'abondance des lianes telles que *Gnetum ula*, indique également le degré d'ouverture de la canopée dans les forêts sempervirentes.

- **Proportion de taxons sempervirents/décidus et phénologie**

Outre les différences de compositions floristiques, les forêts sempervirentes, comme leur nom l'indique se distinguent des forêts décidues par l'abondance de plantes de phénologie sempervirente. Dans la mesure où les taxons abondants dans la pluie pollinique représentent rarement les espèces typiques de la végétation, il nous a paru intéressant de tester la capacité de la pluie pollinique actuelle à reproduire le caractère sempervirent ou décidu des formations échantillonnées. Le caractère sempervirent, semi-sempervirent ou décidu de la végétation résultant d'une adaptation aux contraintes environnementales telles que la pluviométrie et/ou le stress hydrique engendré par la saison sèche (Neilson *et al.*, 1989; Orshan, 1989), il est d'une importance majeure de pouvoir le caractériser au niveau des spectres polliniques en vue d'une modélisation future des végétations tropicales.

A l'aide de flores (Gamble, 1916-1935; Hooker, 1872-1897; Watson and Dallwitz, 1992) et des informations collectées par les botanistes (Pascal, 1986; Pascal, 1988), nous avons pu déterminer la phénologie, i.e. le caractère décidu ou sempervirent de certaines plantes arborées et arbustives représentées dans la pluie pollinique (Tableau III.1). En ce qui concerne les plantes herbacées, seules les herbacées pérennes ont été considérées comme pouvant être classées sempervirentes ou décidues. Les plantes herbacées annuelles n'ont pas été considérées.

	Sempervirent	Décidu	Sempervirent ou décidu	Non-déterminé
AP	63	18	31	24
C	3	1	2	4
NAP	6	1	6	11
NC	3	1	9	1

Tableau III.1 : Répartition des 184 taxons polliniques du dataset des Ghâts occidentaux en fonction de la phénologie des plantes qu'ils représentent.

Dans la mesure où un taxon pollinique correspond à plusieurs espèces et/ou genres, il est assez fréquent de ne pas pouvoir déterminer si dans le spectre pollinique, le taxon représente une plante sempervirente ou décidue. De plus, l'information sur la phénologie des plantes n'étant pas toujours disponible dans la littérature, le caractère décidu ou sempervirent d'un bon nombre de taxons n'a pas pu être déterminé. Pour palier à ce manque d'information, nous avons tenu compte de l'abondance du taxon dans les différents types de végétation et des résultats des analyses factorielles présentées précédemment.

Dans la figure III.14, nous avons représenté sous la forme d'un diagramme pollinique synthétique, les pourcentages de pollens « sempervirents » (représentant des plantes sempervirentes ou des plantes abondantes dans les forêts sempervirentes) en fonction du pourcentage des pollens « décidus » (représentant des plantes de phénologie décidue ou des plantes abondantes dans les forêts décidues). Les spectres polliniques sont arrangés sur l'axe vertical en fonction du type de végétation dans lequel ils ont été collectés.

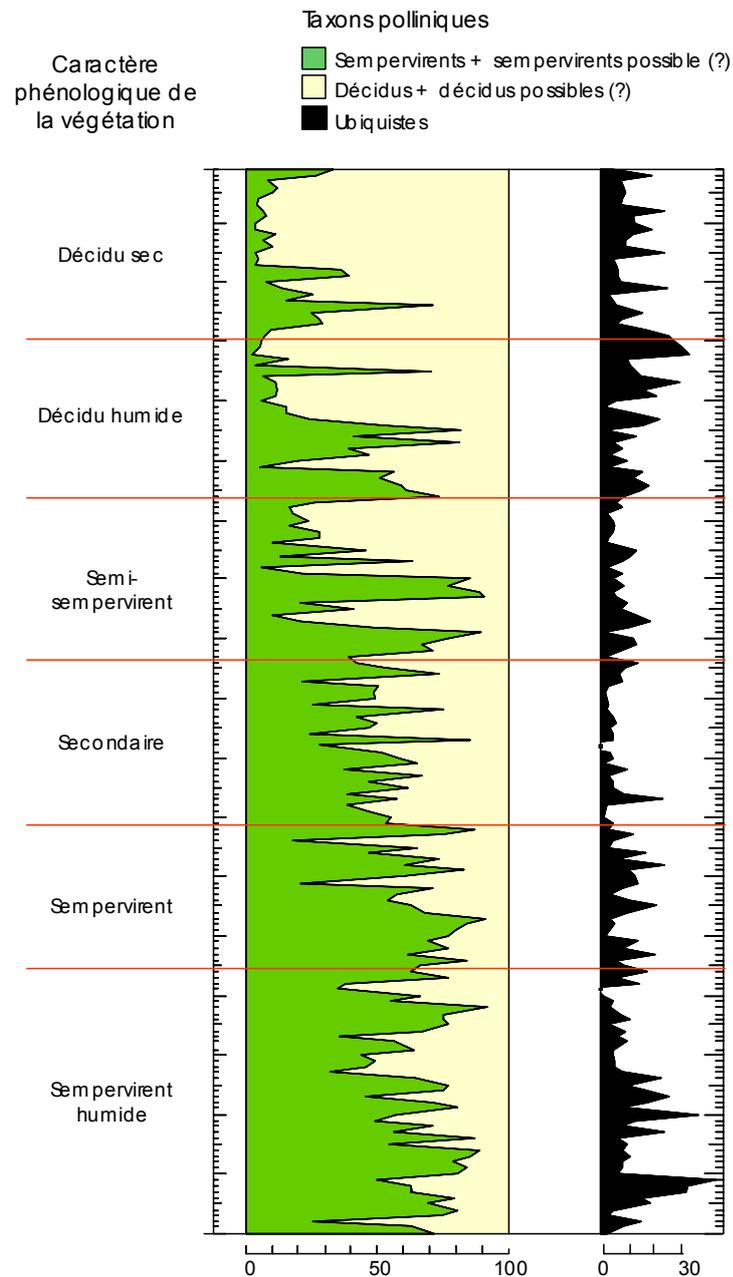


Figure III.14 : Diagramme synthétique des pourcentages de pollens représentant dans la pluie pollinique des plantes sempervirentes ou décidues.

Cette représentation graphique met en évidence les forêts décidues, à l'exception des forêts décidues de l'extrême sud de la péninsule indienne, sont caractérisées par une pluie pollinique dans laquelle la proportion des taxons sempervirents est inférieure à 10-20%, tandis que la pluie pollinique des forêts semi-sem-pervirentes, sempervirentes et sempervirentes humides est caractérisée par des pourcentages de taxons sempervirents supérieurs en moyenne à 50%. Malgré les variations, on peut dire que le caractère phénologique sempervirent ou décidu de la végétation tropicale est reproduit dans la pluie pollinique actuelle.

Synthèse : Relation Pollen / Végétation / Biomes

L'ensemble des résultats obtenus sur le signal pollinique du climat et de la végétation sont présentés sous la forme d'un schéma, dans lequel sont mis en parallèle les types de végétations identifiés par les botanistes (figure III.15) et les associations polliniques que nous avons déterminées comme étant caractéristiques de ces types (figure III.16).

Les taxons polliniques marqueurs des types de végétation ont été identifiés à l'aide des AFC réalisées sur l'ensemble des 180 spectres et aussi sur des sous-ensembles de spectres. Elles sont présentées en partie dans les différentes publications présentées précédemment (Barboni and Bonnefille, submitted; Barboni *et al.*, submitted; Bonnefille *et al.*, 1999). Nous résumons ici les principales caractéristiques de la pluie pollinique permettant de discriminer les différents types de végétation présents en Inde du sud.

- **Conclusions sur la relation Pollen – Végétation tropicale**

La pluie pollinique d'échantillons de sol de surface présente des différences de composition et des caractéristiques remarquables, qui permettent de distinguer les différents types de végétations rencontrés dans la région des Ghâts occidentaux, malgré le fait que les principaux marqueurs botaniques de ces forêts tropicales ne soient pas enregistrés dans la pluie pollinique.

L'ensemble des différents types de forêts sempervirentes *s.l.* se distinguent des forêts décidues par :

1. des pluies polliniques de compositions différentes. Les marqueurs polliniques des forêts sempervirentes *sensu lato* sont les AP *Mallotus**, *Gnetum ula*, *Tetrameles nudiflora*, *Elaeocarpus*, *Syzygium** et *Piper**, tandis que Melastomataceae/Combretaceae, *Maytenus**, *Neonauclea**, *Lagerstroemia* et Poaceae sont les taxons marqueurs des forêts décidues.
2. une proportion de taxons arborés différente. Les forêts sempervirentes sont caractérisées par une pluie pollinique où la proportion moyenne des taxons arborés est supérieure à 50%, tandis qu'elle est de 35% en moyenne pour les forêts décidues (Figure III.12)
3. une plus grande richesse taxonomique. En moyenne, la pluie pollinique des forêts sempervirentes contient plus de 20 taxons arborés différents. Le nombre de taxons arborés est inférieur à 15 dans les spectres polliniques des formations décidues (Figure III.11).
4. une plus grande proportion de taxons sempervirents. En dépit de nombreuses variations, la pluie pollinique des forêts sempervirentes contient en moyenne plus de 50% de pollens des taxons représentant des plantes sempervirentes. Le pourcentage de pollen de plantes sempervirentes est inférieur à 50% dans la pluie pollinique des formations décidues, à l'exclusion des formations riveraines et des formations décidues d'ailleurs particulières du sud de la péninsule indienne (Figure III.14).

Les forêts sempervirentes de basse (0-800 m), moyenne (800-1400 m) et haute altitude (>1400 m) se distinguent les unes des autres essentiellement par des pluies polliniques de composition différente. Les marqueurs polliniques des forêts de haute altitude (shola) sont *Ilex*, *Rapanea*, *Olea glandulifera*, *Daphniphyllum*, *Eleagnus*, *Rhododendron* et *Gordonia*. Les marqueurs des forêts sempervirentes humides de moyenne altitude sont *Mallotus**, *Ficus*, *Syzygium**, *Cullenia exarillata* et *Gordonia*. Les marqueurs des forêts sempervirentes de moyenne altitude sont en autres *Olea dioica*, *Ixora**, *Clausena*, *Trema* et *Randia** (Figure III.16). L'analyse factorielle des correspondances indique également qu'entre 500 et 800 m d'altitude, la composition de la pluie pollinique des forêts sempervirentes *sensu lato* présente des différences de composition. La proportion de taxons arborés contenus dans la pluie pollinique des types sempervirentes (*sensu lato* à l'exception du type semi-sempervirent) ne présente pas de différences majeures en fonction de l'altitude, du moins entre 0 et 1400 m (en moyenne 50% d'AP) (Figure III.12). Le nombre de taxons arborés contenus dans la pluie pollinique de ces types de forêts sempervirentes ne varie pas non plus en fonction de l'altitude (Figure III.11).

Les forêts sempervirentes selon le gradient latitudinal, humides (8°-11°N), sempervirentes (11°-13°30'N) et semi-sempervirentes (13°30'N- 16°N) se distinguent les unes des autres par :

1. des pluies polliniques de compositions différentes. Les marqueurs polliniques des forêts sempervirentes humides sont principalement *Mallotus**, *Tetrameles nudiflora*, *Piper**, *Gnetum ula*, *Elaeocarpus* à basse altitude et *Cullenia exarillata* à moyenne altitude. Les marqueurs des forêts sempervirentes sont *Syzygium**, *Securinega**, *Diospyros*, à basse altitude et *Olea dioica*, *Ixora**, *Clausena** entre autre à moyenne altitude. Les marqueurs polliniques des forêts semi-sempervirentes sont les Melastomataceae/Combretaceae, *Aporosa*, *Justicia**, *Schleichera oleosa* et *Glochidion** (Figure III.16).
2. des pourcentages de taxons polliniques arborés différents. La proportion des AP est supérieure à 50% dans la pluie pollinique des forêts sempervirentes et sempervirentes humides, tandis qu'elle est comprise entre 40 et 50% pour les forêts semi-sempervirentes (Figure III.12).
3. une richesse taxonomique différente. Le nombre de taxons arborés contenus dans la pluie pollinique des forêts semi-sempervirentes est de 15 environ, ce qui est proche de celui des formations décidues (Figure III.11).
4. une proportion de taxons sempervirentes inférieure.

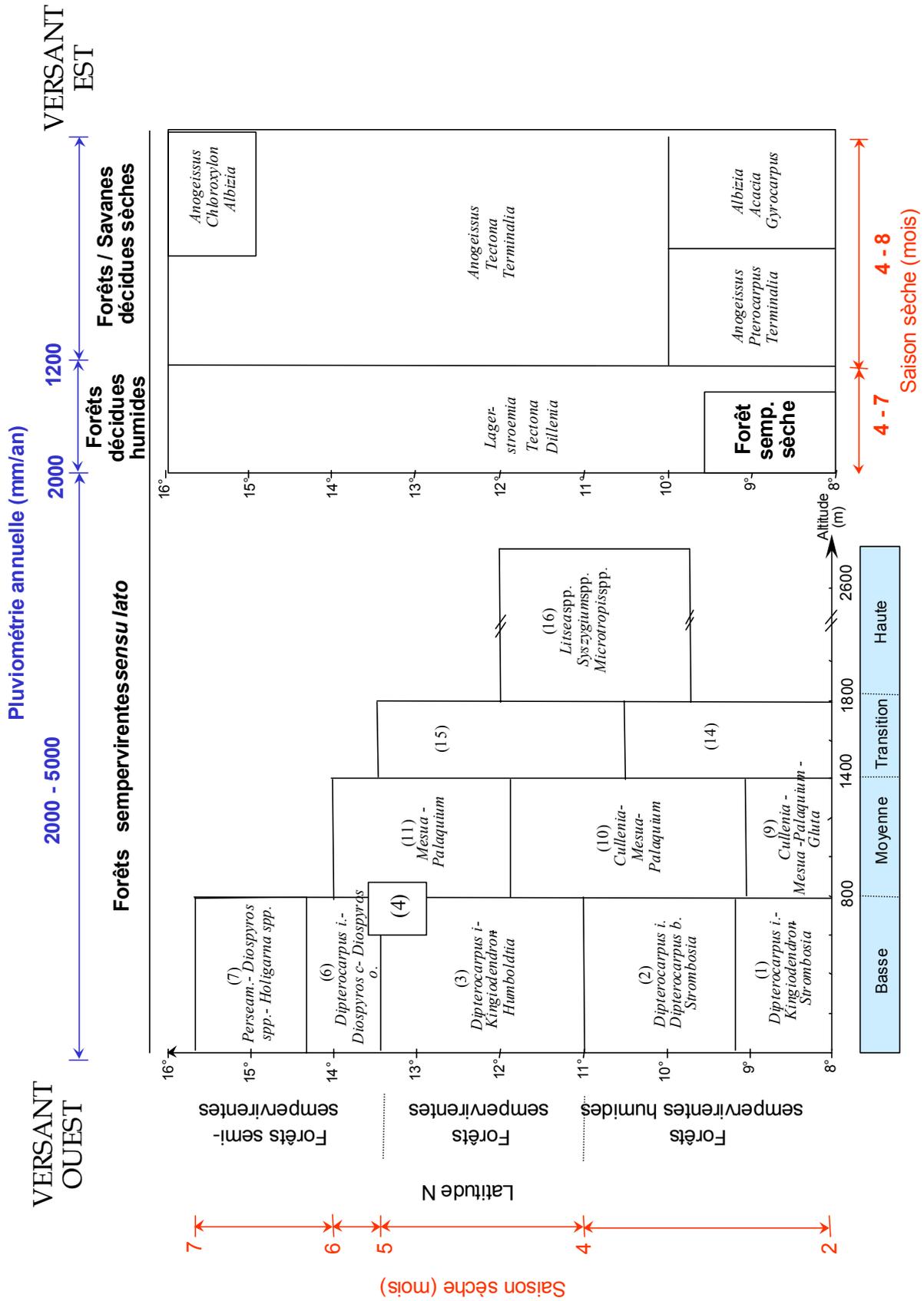


Figure III.15 : Subdivisions de la végétation en **types floristiques**, d'après la classification botanique en vigueur (Pascal *et al.*, 1982a; Pascal *et al.*, 1982b; Pascal *et al.*, 1984; Ramesh *et al.*, 1998).

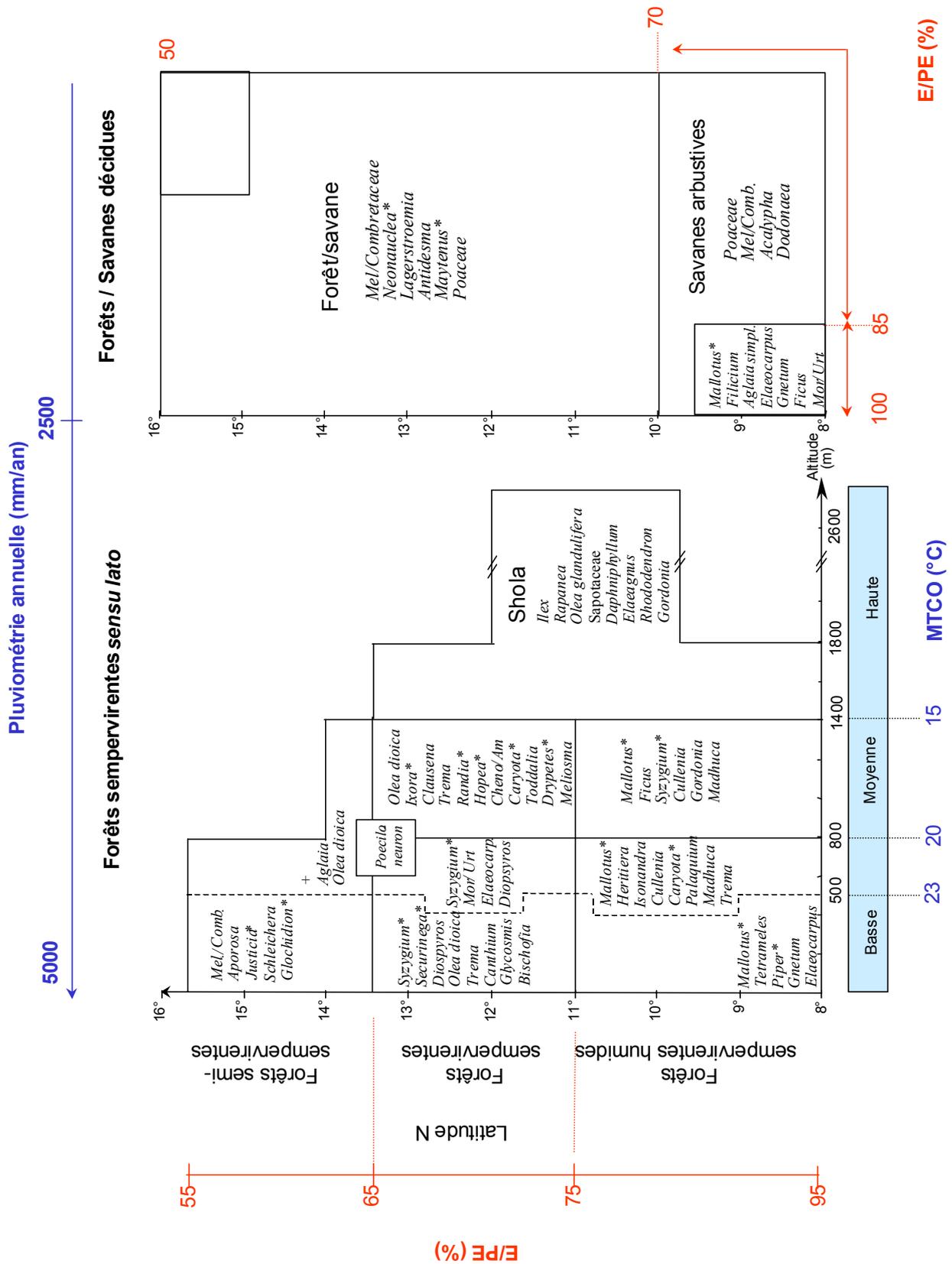


Figure III.16 : Subdivision de la végétation en pollen-zones, d'après des AFC.

Les AFC montrent aussi que les forêts « sempervirentes sèches » (selon la classification en vigueur) qui sont localisées sur les versants Est des Ghâts dans l'extrême sud de la péninsule indienne, présentent une pluie pollinique de composition similaire à celles des forêts sempervirentes humides du versant Ouest, recevant directement les pluies de la mousson d'été.

La pluie pollinique des différents types de **forêts décidues** ne présente pas de différences de composition majeures, ni de caractéristiques particulières permettant de différencier les formations décidues humides des décidues sèches selon la classification en vigueur. Cependant, il apparaît que les formations décidues localisées à l'extrême sud de la péninsule (entre 8° et 10°N) se distinguent des formations décidues localisées entre 10° et 16°N, par des pluies polliniques de composition différente. Les marqueurs polliniques des forêts décidues du sud de l'Inde sont les Poaceae, Melastomataceae/Combretaceae, *Acalypha* et *Dodonaea viscosa*, tandis que *Neonauclea** (*Haldina*), *Lagerstroemia* et *Maytenus** sont les marqueurs polliniques des forêts décidues du « nord » (jusqu'à 16°N).

En conclusion de ce travail on peut dire que sur la base des spectres polliniques d'échantillons de surface de sol, les grands types de végétations des Ghâts occidentaux peuvent être distingués. On a donc une bonne reproduction pollinique de la classification botanique en vigueur. Cette conclusion est d'une importance majeure pour la biomisation des végétations du sous-continent indien, car c'est sur la base des distinctions apparentes dans la pluie pollinique actuelle que pourront s'interpréter les changements de végétation du passé.

- **Conclusions sur la relation Pollen – Biomes tropicaux**

La méthode de l'analyse factorielle des correspondances a permis d'interpréter les différences de composition de la pluie pollinique comme étant le résultat de contraintes climatiques et environnementales sur la végétation actuelle. Sur la figure III.15, nous avons reporté selon les évaluations des botanistes, les seuils climatiques déterminant la distribution géographique actuelle des types de végétation de l'Inde du sud. En parallèle, nous avons reporté sur la figure III.16, les seuils climatiques qui déterminent les limites des zones polliniques, telles que nous les avons calculées dans ce travail.

D'après les observations botaniques, le montant annuel des précipitations détermine l'existence des forêts sempervirentes *sensu lato* (PANN > 2000 mm/an) et des forêts décidues (PANN < 2000 mm/an) (Pascal, 1988). L'estimation de PANN à chacun des sites polliniques a

plutôt mis en évidence que la pluie pollinique actuelle présente une composition et des caractéristiques (richesse taxonomique, abondance des pollens d'arbres, abondance des pollens de plantes sempervirentes) différentes selon que PANN est supérieure ou inférieure à 2500 mm/an. Cette limite de PANN à 2500 mm/an semble être bon un critère de distinction entre végétation sempervirente et végétation décidue (Barboni and Bonnefille, submitted).

D'après les observations botaniques, les forêts « sempervirentes humides » se développent lorsque la saison sèche est inférieure à 4 mois, ce qui correspond à un coefficient d'humidité calculé selon Biome1, $E/PE > 75\%$. Elles sont remplacées par les forêts « sempervirentes » lorsque la saison sèche est de 4 à 5 mois ($E/PE = 65-75\%$) et par les forêts « semi-sempervirentes » lorsque la saison sèche excède 5 mois ($E/PE < 65\%$) (Pascal, 1988). En accord avec les observations botaniques, la pluie pollinique reflète ces différences de composition en fonction du facteur climatique de la saisonnalité des précipitations et du coefficient d'humidité (Barboni *et al.*, submitted). Il est également apparu dans cette étude, que le coefficient d'humidité (E/PE), liée à une pluviométrie < 1500 mm/an, est le facteur climatique permettant d'expliquer les différences de composition de la pluie pollinique existant entre les formations décidues du sud de la péninsule ($8^{\circ}-10^{\circ}N$) et celles nord ($10^{\circ}-16^{\circ}N$). La pluviométrie et le coefficient d'humidité E/PE semblent être les deux facteurs climatiques déterminant les principales caractéristiques de la pluie pollinique actuelle des forêts tropicales de l'Inde du sud. Le modèle Biome1 ne prend en considération que deux valeurs, à 45% et à 80% pour E/PE . Notre étude sur les Ghâts porte sur l'intervalle 50-100%. Dans cet intervalle, nous avons mis en évidence des nouvelles valeurs limites pour les types de végétations, à 65% et 75%. On voit donc comment les résultats obtenus dans ce travail vont pouvoir contribuer à préciser les modèles de Biome en introduisant ces deux limites supplémentaires, ceci dans le but d'obtenir des modélisations de plus en plus réalistes du couvert végétal et proches des cartographies de la végétation résultant du travail de terrain des botanistes.

Les différences de composition floristique et de physionomie existant entre les forêts sempervirentes *sensu lato* de basse, moyenne et haute altitude sont fonction de la température (Pascal, 1988). Les seuils thermiques déterminant l'existence des forêts de basse, moyenne et haute altitude sont respectivement $MTCO = 20^{\circ}C$ et $MTCO = 15^{\circ}C$ (Figure III.16). Dans cette étude, il a également été montré qu'une limite thermique à $MTCO = 23^{\circ}C$ (environ 500 m d'altitude) semble déterminer des différences de composition remarquables dans la pluie pollinique actuelle.

La figure III.16 résume les résultats acquis sur la relation Végétation / Pollen / Biomes. Les valeurs de précipitation moyenne annuelle (PANN), du coefficient d'humidité (E/PE) et de la température moyenne du mois le plus froid (MTCO) conditionnent la répartition géographique des différents types de végétation en Inde du sud étudiés dans ce travail. Les seuils climatiques déterminant le domaine d'existence des types de végétation peuvent être identifiés par leurs caractéristiques polliniques. Les différentes combinaisons des valeurs qui définissent ces végétations tropicales sont reproduites dans ce graphique à trois dimensions.

Les flèches avec les indications n°1, n°2 et n°3 signalent les publications correspondant à chacun des gradients climatiques respectivement discutés dans ce travail.

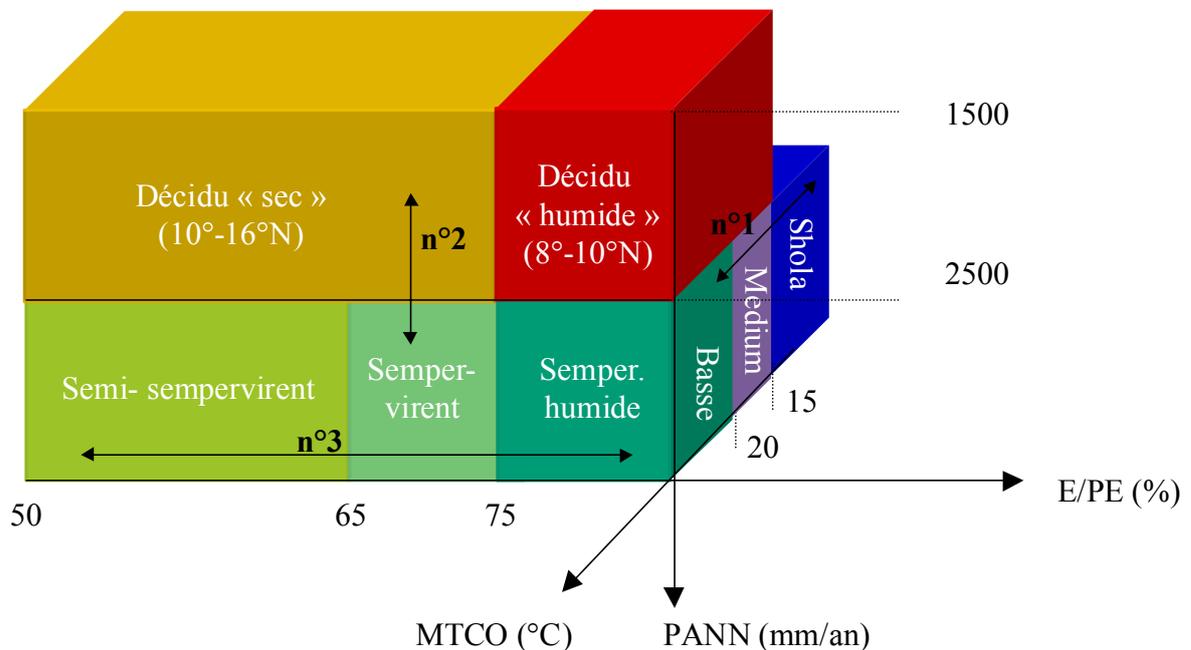


Figure III.17 : Domaines d'existence des différents types de végétations du l'Inde du sud, définis par des seuils climatiques de température (MTCO, °C), pluviométrie (PANN, mm/an) et humidité (E/PE, %).

En conclusion, dans cette étude palynologique des forêts tropicales du sud de l'Inde, nous avons montré que les gradients de pluviométrie, de longueur de la saison sèche et de la température sont clairement exprimés dans la pluie pollinique actuelle. Dans la mesure où les modèles de Biome tentent de reproduire une distribution réaliste de la végétation actuelle en fonction de seuils climatiques, nous proposons le modèle conceptuel illustré dans la figure III.17, pour les végétations tropicales du sud de l'Inde, avec comme seuils climatiques majeurs :

1. MTCO = 15°C : En dessous de ce seuil thermique, i.e. à une altitude >1500 m, les forêts sempervirentes changent drastiquement de composition floristique et de physionomie. Ce seuil, qui définit le domaine d'existence des forêts de haute altitude (shola), correspond à une limite physiologique de tolérance maximum au froid, en dessous de laquelle les plantes tropicales feuillues sempervirentes ne peuvent survivre (Prentice *et al.*, 1992; Woodward, 1987). Ce seuil qui dans les régions tropicales distingue le domaine montagnard est aussi le même qui dans le modèle global de végétation sépare le domaine tempéré du domaine tropical.
2. MTCO = 20°C : Ce seuil thermique, qui correspond à une altitude moyenne de 800 m, marque des changements de composition floristique dans la pluie pollinique des forêts sempervirentes. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle d'étude montrant l'importance physiologique de cette limite thermique. Ce seuil ne correspond pas à un changement de physionomie de la végétation. Notre étude montre qu'il pourrait bien jouer un rôle important dans la compétitivité des espèces puisqu'il correspond à des végétations de composition botanique et pollinique distinctes.
3. PANN = 2500 mm/an : Ce seuil pluviométrique est responsable de changements importants dans la composition de la pluie pollinique, et détermine des changements importants dans la végétation (composition et physionomie). En dessous de ce seuil pluviométrique, les forêts sempervirentes ne peuvent se développer en Inde tropicale, et ce quel que soit le stress hydrique résultant principalement de la longueur de la saison sèche.
4. PANN = 1500 mm/an : Entre 1500 et 2500 mm/an se développent les forêts décidues, et ce quel que soit les valeurs du coefficient d'humidité.
5. E/PE = 75% : Lorsque le coefficient d'humidité est >75%, le stress hydrique subi par les plantes est faible. Une combinaison de E/PE >75% et de PANN >2500 mm/an, conditionne l'existence des forêts sempervirentes humides. Là où PANN est compris entre 1500 et 2500 mm/an, E/PE = 75% conditionne l'existence des forêts décidues de l'extrême sud de la péninsule indienne.
6. E/PE = 65% : Le seuil d'humidité E/EP = 65% semble être un critère valable pour séparer les forêts semi-sempervirentes des forêts sempervirentes lorsque PANN est >2500 mm/an. Cette limite correspond à des changements de composition floristique et phénologique de la végétation, qui sont évidentes aussi dans la pluie pollinique actuelle.

Utiliser la validité de ces seuils à reproduire les végétations tropicales, et les intégrer dans une nouvelle version du modèle global de végétation (Biome 4) est une perspective de recherche que nous allons développer dans le cadre du post-doctorat prochainement prévu à l'Institut Max Planck de Jena (Allemagne).

Dans un autre domaine, une autre application de nos résultats concerne la reconstruction climatique basée sur la méthode de la régression multiple linéaire appliquée à des spectres polliniques fossiles.

CHAPITRE IV. Reconstructions climatiques

Simulations climatiques et données paléoclimatiques indiquent que d'important changements climatiques liés au forçage astronomique ont eu lieu dans le passé. Le forçage astronomique conditionne l'alternance de périodes froides (glaciaires) et chaudes (interglaciaires) et l'alternance de périodes où la mousson est intensifiée ou affaiblie (Joussaume *et al.*, 1999). Pour l'Inde du sud, située en plein dans la région de mousson, il n'existe pas de reconstructions quantitatives des changements paléoclimatiques. Les quelques études palynologiques et de $\delta^{13}\text{C}$ indiquent des conditions climatiques continentales plus froides et plus sèches durant la période glaciaire dans le sud de l'Inde (Gupta and Prasad, 1985; Sukumar *et al.*, 1993; Sutra *et al.*, 1997; Vasanthi, 1988).

Les enregistrements historiques, telles les marques de crue du Nil en Egypte qui remontent dans le temps jusqu'à 5000 ans BP ont permis de mettre en évidence une variabilité de la mousson à travers les siècles (Lamb, 1977; Toussoun, 1925; Walker, 1910). Cette variabilité à l'échelle du millénaire se surimpose à la variabilité inter- décennale et suivrait un cycle de 50 à 100 ans (Kutzbach, 1987).

Au-delà de 5000 ans BP, seuls les enregistrements géologiques terrestres (tels que les pollens qui documentent les changements de végétations, les diatomées qui permettent d'évaluer les niveaux de lacs, et la susceptibilité magnétique des particules éoliennes qui renseigne sur la direction et la force des vents), ainsi que les enregistrements marins (e. g. les foraminifères qui permettent d'estimer l'intensité des upwellings) témoignent des changements de mousson. Plusieurs études ont montré que l'intensité de la mousson était largement plus faible qu'actuellement en période glaciaire (*ca.* 18000 ans BP) et beaucoup plus forte du début de l'Holocène à l'Holocène moyen (*ca.* 9000 à 5000 ans BP) aussi bien en Afrique de l'est (par exemple (Bonnefille *et al.*, 1991; Gasse *et al.*, 1989; Gillepsie *et al.*, 1983; Owen *et al.*, 1982; Pachur and Hoelzmann, 1991; Pachur and Kröpelin, 1987; Ritchie and Haynes, 1987; Street-Perrott and Perrott, 1990; Taylor, 1990), en Arabie (Clarkes and Fontes, 1990; McClure, 1976) et en Asie (An *et al.*, 1993; An *et al.*, 1991; Gasse and 12 others, 1991; Gasse and Van Campo, 1994; Jarvis, 1993; Porter *et al.*, 1992). En Inde, l'étude d'enregistrements palynologiques et de séquences sédimentaires provenant de lacs salés du Rajasthan, a montré que le montant annuel des précipitations aurait atteint 500 mm/an entre 10000 et 4000 ans BP, soit environ le double de sa valeur actuelle (Bryson and Swain, 1981; Singh *et al.*, 1990; Swain *et al.*, 1983). Pollens

et foraminifères de sédiments marins provenant de Mer d'Arabie, reflètent ces mêmes variations d'intensité de la mousson (Duplessy, 1982; Overpeck *et al.*, 1996; Prell and Van Campo, 1986; Prell, 1984; Prell *et al.*, 1990; Sirocko *et al.*, 1991; Van Campo *et al.*, 1982).

L'amplitude des changements induits par la variabilité de la mousson à l'échelle du millénaire est très largement supérieure à celles engendrées par les variabilités inter- annuelle et inter- séculaire. Les données paléoclimatiques et les simulations climatiques produites par les modèles de circulation atmosphérique, suggèrent que deux mécanismes physiques ou forçages, jouent un rôle majeur dans la variabilité de l'intensité de la mousson à l'échelle du millénaire. Dans les modèles numériques l'intensité de la mousson est estimée entre autres par l'importance des flux de chaleur latente, de la vitesse des vents de surface et la circulation atmosphérique verticale. Bien que les estimations climatiques divergent selon les modèles utilisés, les résultats des simulations reproduisent les mêmes tendances. Ainsi, le forçage le plus déterminant serait le forçage radiatif. Etant plus ou moins intense selon la position de la terre lors de la précession des équinoxes, le forçage radiatif qui contrôle la quantité d'insolation saisonnière atteignant la Terre, détermine la capacité de réchauffement du Plateau Tibétain. Simulations climatiques et données paléoclimatiques montrent que l'indice d'upwelling en Mer d'Arabie (Clemens *et al.*, 1991; Prell and Van Campo, 1986; Prell, 1984), la force des vents de mousson sud-ouest (Clemens and Prell, 1991) et les niveaux des lacs en Arabie et au nord-ouest de l'Inde (Bryson and Swain, 1981; McClure, 1976; Singh *et al.*, 1972; Swain *et al.*, 1983) ont atteint des valeurs maximales lorsque l'insolation a été maximale dans l'hémisphère sud en été (périhélie coïncidant avec le solstice d'été, e. g. à 6 ka et 126 ka BP) (Clemens and Prell, 1990; COHMAP, 1988; de Menocal and Rind, 1993; de Noblet *et al.*, 1996; Kutzbach, 1981; Kutzbach and Street-Perrott, 1985; Overpeck *et al.*, 1996; Prell and Kutzbach, 1992; Prell, 1984; Prell and Kutzbach, 1987; Street-Perrott and Perrott, 1990).

De nombreux tests de sensibilité effectués par différents modèles de circulation atmosphérique suggèrent que certains mécanismes aient altéré la réponse de la mousson au forçage astronomique. Ainsi la quantité de glace polaire, les températures océaniques de surface, l'albédo et les concentrations de gaz trace dans l'atmosphère pendant la dernière période glaciaire, auraient eu tendance à affaiblir le système de mousson d'été (accompagné d'une diminution des précipitations dans certaines régions d'Asie, notamment en Inde) et à renforcer la mousson asiatique d'hiver (de Menocal and Rind, 1993; Prell and Kutzbach, 1987). D'autres tests de sensibilité ont montré que l'élévation du Plateau Tibétain au Cénozoïque a eu pour effet en outre, d'augmenter l'intensité de la mousson asiatique et les précipitations en Asie du sud-est (Kutzbach *et al.*, 1989; Ruddiman *et al.*, 1989; Rudiman and Kutzbach, 1989). Il a aussi été suggéré qu'en réduisant de 500 m l'altitude du Plateau Tibétain, la pénétration de la

mousson d'été vers le nord soit considérablement réduite (de Menocal and Rind, 1993). L'effet de l'orogénèse, de la tectonique des plaques et de la distribution des continents et des océans auraient joué un rôle considérable il y a 10 à 30 millions d'années, dans la mise en place du système climatique de mousson (Ramstein *et al.*, 1997).

Dans les chapitres précédents nous avons montré que les assemblages polliniques actuels caractérisent bien les différents types de végétation de l'Inde du sud. Il a également été démontré statistiquement que les différences majeures existant entre les divers assemblages polliniques s'expliquent essentiellement par les différences de températures, précipitations et de longueur de la saison sèche auxquelles sont soumises les végétations. Le signal climatique actuel étant enregistré par les spectres polliniques, une relation mathématique peut donc être établie entre pollen et paramètres climatiques. Cette fonction permettra à partir de la composition pollinique de niveaux sédimentaires fossiles, d'estimer quantitativement les valeurs de certains paramètres climatiques majeurs qui ont caractérisé le climat de la mousson d'été asiatique dans le passé.

Successivement seront décrit dans les paragraphes suivants les étapes et résultats obtenus sur la mise au point des fonctions de transfert pollen – température (section 1), pollen – précipitations (section 2) et pollen – saisonnalité (section 3). Les valeurs de température, précipitation et saisonnalité estimées à partir des assemblages polliniques fossiles provenant de carottes marines prélevées en Mer d'Arabie seront données et discutées dans la section 4.

1. Fonction de transfert POLLEN – TEMPERATURE

1.1. Domaine d'application

Pour mettre au point la fonction de transfert Pollen – Climat pour la température, nous avons utilisé une base de données élargie aux végétations d'altitude. Celle-ci comprend donc les données polliniques acquises précédemment et incluses dans la publication n°1 (Bonnefille *et al.*, 1999). Ceci fournit un jeu de données composé de 242 spectres entre 60 et 2420 m d'altitude et correspond à un gradient de TANN entre 14°C et 28°C et de MTCO entre 11°C et 26°C, avec une majorité de spectres (plus de 200) dans les intervalles respectifs de 20° à 28°C (TANN) et 18° à 26°C (MTCO). Cette abondance de données garantit la qualité de la fonction de transfert pollen – température dans cet intervalle.

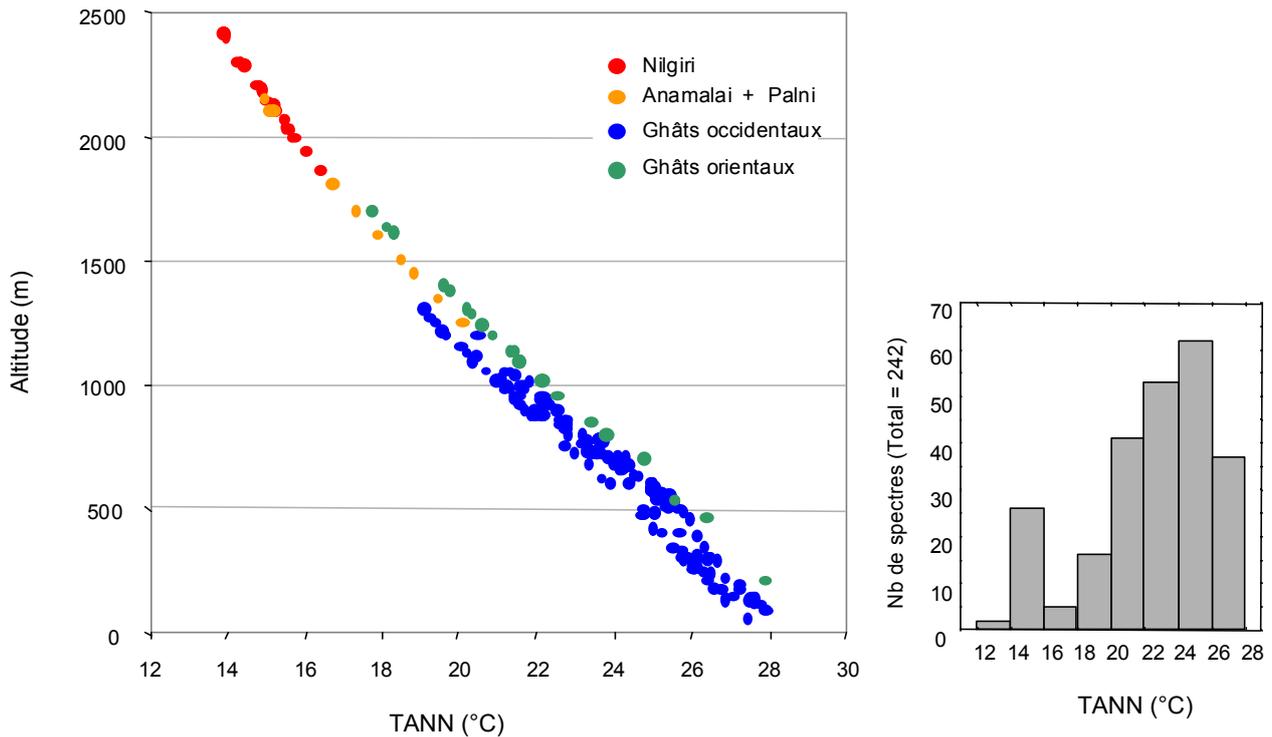


Figure IV.1 : Distribution des 242 spectres polliniques actuels en fonction de l'altitude et de la température du mois la température annuelle (TANN, °C).

1.2. Taxons polliniques marqueurs de température

Méthode

Les 242 spectres considérés pour calibrer la fonction de transfert contiennent un total de 229 taxons polliniques et spores, après exclusion des introduits, cultivés, aquatiques et taxons de mangroves. Parmi ces 229 taxons, nous avons ensuite sélectionné uniquement ceux ayant des fréquences >1% dans au moins 3 spectres. Cette première sélection ramène à 100 la liste des taxons testés pour leur sensibilité par rapport au paramètre température. Nous utilisons les pourcentages polliniques calculés sur la somme des taxons considérés. Le pourcentage des spores est calculé sur la somme des pollens plus spores. Les fréquences polliniques sont ensuite transformées sous forme logarithmique pour atténuer l'effet des variations des forts pourcentages qui occultent celles des faibles pourcentages (Roeland *et al.*, 1988). La fonction de régression pour estimer une variable climatique Y à partir des pourcentages de taxons polliniques marqueurs est de la forme :

$$Y = a_0 + a_1 \times \text{Log} [(P_1 \times 10) + 1] + a_2 \times \text{Log} [(P_2 \times 10) + 1] + \dots + a_x \times \text{Log} [(P_x \times 10) + 1]$$

a : coefficients de la régression

P : pourcentages polliniques des taxons marqueurs

L'extraction des taxons polliniques marqueurs de la température s'effectue par traitement numérique à l'aide des statistiques de la régression multiple proposé par le logiciel PPPhalos (Guiot, 1990). Des modèles de régression multiple linéaires, construits pour donner la meilleure prévision de la température ont permis d'examiner toutes les variables indépendantes (taxons) et d'évaluer celles qui contribuent le plus à estimer la variable dépendante (TANN ou MTCO, °C). La procédure de sélection des taxons a été guidée par les valeurs du rapport entre le coefficient de régression standardisé et moyenné sur 50 calibrations d'une variable et son écart type. La valeur de ce rapport indiquant la significativité statistique de chaque taxon, il mesure le degré auquel un taxon contribue à lui seul à la prévision de la température. Dans la mesure où nous allons appliquer ces fonctions de transfert aux niveaux marins fossiles des carottes SK128A-30 et -31, dont nous disposons des comptages polliniques, nous avons essayé de calibrer les fonctions en intégrant le plus possible les taxons représentés dans ces carottes.

Les marqueurs identifiés comme régresseurs pour la variable Température

Trente taxons polliniques sur les 100 présents à plus de 1% dans au moins 3 spectres ont été identifiés par les analyses statistiques comme marqueurs de la variable température. Ils sont donnés dans le tableau IV.1. Leur significativité statistique à reconstruire la température est représentée dans la figure IV.2.

Basses températures	☐	S☐	Hautes températures	☐	S☐
Ilex	-0.144	0.021	Schleichera oleosa	0.131	0.023
Spores monolètes	-0.131	0.031	Tetrameles nudiflora	0.168	0.030
Type <i>Olea glandulifera</i>	-0.098	0.025	Gnetum ula	0.109	0.022
Rapanea	-0.117	0.031	<i>Lannea type</i>	0.092	0.023
Compositae type fenestré	-0.075	0.021	Melast./Combretaceae	0.091	0.027
Rutaceae	-0.088	0.027	Holigarna	0.066	0.021
Meliosma	-0.081	0.028	<i>Justicia</i>	0.072	0.023
Impatiens	-0.066	0.023	Type <i>Hopea</i>	0.074	0.024
Chrysophyllum	-0.062	0.023	Aporosa	0.071	0.027
Daphniphyllum neilgherrense	-0.078	0.030	<i>Caryota</i>	0.077	0.037
Ficus	-0.067	0.030	Lamiaceae	0.045	0.021
Bischofia	-0.049	0.027	Carallia	0.037	0.026
Symplocos	-0.041	0.024	Type <i>Calamus</i>	0.034	0.024
Artemisia	-0.038	0.025	Dodoniaea viscosa	0.036	0.044
Type <i>Drypetes</i>	-0.046	0.031			
Type <i>Syzygium</i>	-0.040	0.028			

Tableau IV.1 : Coefficients de régression standardisés et moyennés sur 50 calibrations (☐, moyenne; S☐ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable température.

Les taxons présentant une forte corrélation négative avec la température sont considérés comme marqueurs de basses températures. Ils représentent ici les arbres ou arbustes communs à toutes les forêts sempervirentes d'altitude (> 1400 m) du sous-continent indien et de Sri Lanka (Bonnefille *et al.*, 1999), tels qu'*Ilex denticulatus*, *Rapanea thwaitesii*, *Olea glandulifera*, *Daphniphyllum neilgherrense*, *Meliosma arnottiana*, *M. wightii*, *Symplocos*, *Ficus spp.*, et diverses Rutaceae (e. g. *Pavetta indica*, *Saprosma glomerata*). Il s'y ajoute des arbres tels que et *Chrysophyllum lanceolatum* (Sapotaceae), *Syzygium gardneri*, *S. laetum* (Myrtaceae), *Symplocos macrophylla*, *S. racemosa*, *Bischofia javanica*, *Drypetes elata* (Euphorbiaceae), plutôt abondants à moyenne altitude (650-1400 m) (Pascal, 1988).

Parmi ces marqueurs, *Impatiens* (Basalminaceae) et les Compositae de type fenestré correspondent aux herbes (e. g. *Elephantopus* et *Vernonia*) bien développées à haute altitude (Balsco, 1971). Les spores monolètes ont été identifiées comme de forts marqueurs de basses températures, bien que la distribution des Ptéridophytes ne soit pas connue comme ayant une relation particulière avec l'altitude.

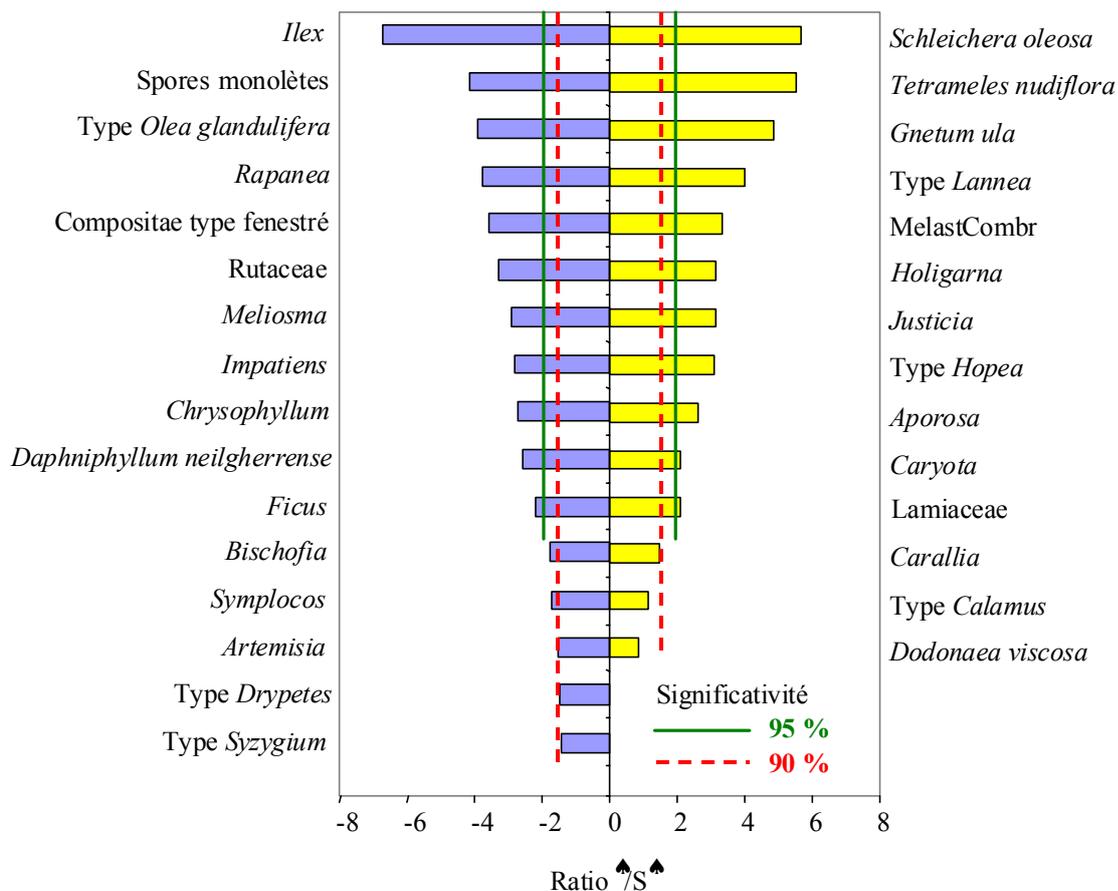


Figure IV.2 : Significativité statistique des 30 régresseurs de la température, calculée à l'aide du ratio $\frac{T}{S}$ et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.

Les taxons présentant une forte corrélation positive avec la température sont considérés comme marqueurs des températures élevées. Ils représentent ici des arbres présents et abondants aussi bien dans les forêts décidues que dans les forêts sempervirentes de basse et moyenne altitude. *Tetrameles nudiflora*, *Hopea*, *Gnetum ula*, *Caryota*, *Carallia*, *Holigarna* et *Aporosa* représentent des taxons botaniques caractéristiques des forêts sempervirentes (Pascal, 1988). *Carallia brachiata* (Rhizophoraceae terrestre), *Holigarna arnottiana*, et *H. grahamii* sont des arbres ou arbustes communs aux forêts sempervirentes de basse et haute altitude (Legris and Meher-Homji, 1977). *Schleichera oleosa*, Melastomataceae/Combretaceae, *Lansea*, *Dodonaea viscosa*, ainsi que *Justicia* et Lamiaceae représentent des arbres et des herbes abondants surtout dans les formations décidues (Pascal, 1986; Pascal and Ramesh, 1995).

1.3. Résultats de la calibration et discussion

Pour vérifier de façon exhaustive la qualité des résultats, c'est à dire la stabilité de l'équation de régression, nous utilisons la méthode Bootstrap qui détermine un grand nombre de fois par tirage au sort, deux ensembles de calibration et de vérification indépendante (Efron, 1979). La calibration, calculée sur chaque premier ensemble est appliquée au second. Cette procédure est répétée 50 fois, après quoi les résultats sont stabilisés. Les résultats sont exprimés par les coefficients de corrélation multiple, moyennés sur les 50 simulations pour l'ensemble de calibration et l'ensemble de vérification. Le coefficient de corrélation obtenu pour la vérification permet d'appréhender la qualité de la reconstruction de la variable température pour de nouvelles observations. Chaque spectre étant alternativement attribué à l'ensemble de calibration, puis à celui de vérification, les corrélations obtenues sont hautement significatives. En effet, la température reconstruite à l'aide des 30 taxons marqueurs sélectionnés par PPPhalos donne des coefficients de corrélation $R_{\text{calibration}} = 0.94$ et $R_{\text{vérification}} = 0.90$.

Les corrélations entre valeurs de température estimées (à partir des données polliniques) et valeurs de température observées (interpolées à partir du réseau météorologique) pour les 242 spectres polliniques sont représentées dans la figure IV.3. Ce graphique montre que l'on peut avoir une bonne reconstruction de la température avec les pollens.

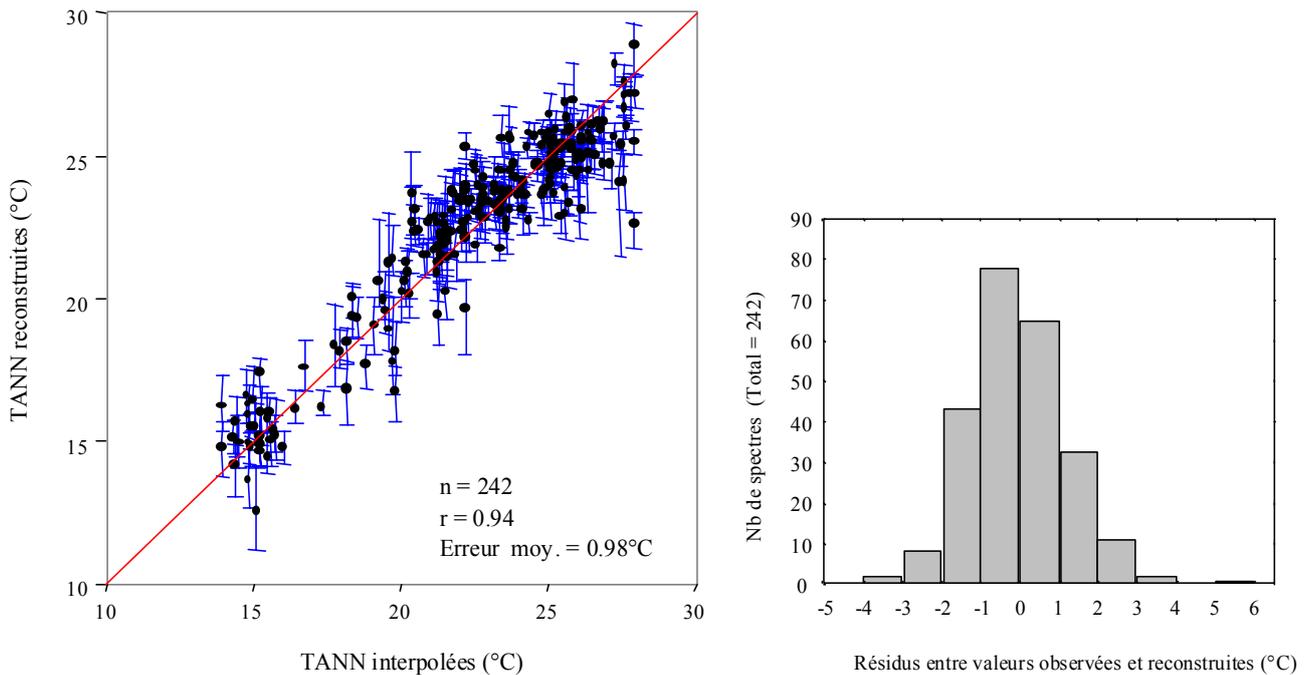


Figure IV.3 : Corrélation entre températures observées et températures reconstruites pour les 242 sites polliniques (températures moyennes annuelles, TANN, °C), et distribution des résidus.

Discussion

L'histogramme des fréquences des résidus est quasiment symétrique (figure IV.3). Il montre que 88% des individus ont un résidu compris entre -2°C et $+2^{\circ}\text{C}$ et que dans 58% des cas le résidu est compris entre -1°C et $+1^{\circ}\text{C}$. L'analyse détaillée des résidus indique que les plus fortes surestimations de température (résidus $< -2^{\circ}\text{C}$) apparaissent pour les spectres provenant de forêts fortement perturbées. Ces spectres, caractérisés par de forts pourcentages de Melastomataceae/ Combretaceae et de *Gnetum ula*, reflètent l'abondance dans la végétation des plantes pionnières, héliophiles telles que *Terminalia* (Combretaceae) et la liane *Gnetum ula*, que l'on rencontre naturellement dans les formations décidues et les forêts sempervirentes de basse altitude (Pascal, 1986; Pascal, 1988). Il est intéressant de noter que certains spectres polliniques provenant de forêts à canopée très ouverte ou de prairies, produisent au contraire une température reconstruite sous-estimée, dû aux forts pourcentages de certains taxons tels que *Daphniphyllum* et *Ilex*. L'ouverture de la canopée semble donc également faciliter l'enregistrement dans les sols des pollens extra-locaux, produits par les types forestiers situés plus en amont du site échantillonné. La perturbation anthropique des forêts, qui se caractérise par la création d'ouvertures de la canopée, engendre donc un biais lors de l'estimation de la température par les données polliniques, lorsqu'elle est importante.

Les plus fortes sous-estimations de température (résidus $> +2^{\circ}\text{C}$) sont obtenues pour les quelques spectres provenant de vase de rivière ou provenant des forêts riveraines. Une sous-estimation de la température par les échantillons de vase s'explique par le fait qu'ils n'enregistrent pas seulement la pluie pollinique de la forêt riveraine, mais aussi le signal des végétations situées plus en amont et donc en zones plus froides. On comprend également que les spectres provenant de formations riveraines localisées à basse altitude ou dans des zones où la température moyenne est plutôt chaude (e. g. les Ghâts orientaux) puissent refléter un microclimat plus frais lié à la présence d'une forêt.

On constate également que dans plusieurs cas, des reconstructions de température sur- et sous-estimées de l'ordre de 2°C , sont directement liées à la forte représentation du taxon *Olea* dans les spectres. L'espèce identifiée sous *O. glandulifera* ressort dans les AFC et le modèle de régression, comme marqueur de basse température. Ceci souligne l'importance d'une identification plus précise que le genre dans la qualité de la reconstruction climatique.

Enfin, pour quelques cas seulement, c'est le manque de spectres disponibles pour la calibration et renseignant les gammes de température TANN = 12°C - 14°C et TANN = 16°C - 18°C qui explique les forts résidus entre températures observées et reconstruites à partir des données polliniques et donc les plus grandes erreurs d'estimation.

En conclusion, les forts coefficients de corrélation de calibration et de vérification obtenus pour une fonction de transfert Pollen – Température avec 242 spectres polliniques actuels, ainsi que la distribution des résidus (9% des cas seulement pour lesquels ils sont supérieurs à $\pm 2^{\circ}\text{C}$) et la valeur de l'erreur moyenne ($+0.98^{\circ}\text{C}$) indiquent que le modèle de prédiction est très satisfaisant. Il peut être valablement appliqué à de nouvelles données polliniques.

2. Fonction de transfert POLLEN – PRECIPITATION

2.1. Domaine d'application

Pour la calibration d'une fonction de transfert Pollen – Précipitations, nous avons pas utilisé les spectres polliniques des Ghâts orientaux, ni ceux provenant des Nilgiri et Palni, dans la mesure où nous n'avons pas disposé de données météo provenant de ces régions. On a donc disposé uniquement des 180 spectres polliniques de ce travail dans les Ghâts occidentaux. Les histogrammes de distribution des 180 spectres dans les différentes gammes de pluviométrie ont déjà été présentés au chapitre II (Figure II.9).

2.2. Taxons polliniques marqueurs de pluviosité

La méthode utilisée pour déterminer les taxons polliniques présentant une affinité particulière avec la pluviométrie est identique à celle présentée dans la partie 2.1. Ainsi, par la méthode de régression multiple, 23 taxons polliniques ont pu être identifiés comme marqueurs de la pluviométrie annuelle (Tableau IV.2). Leur significativité statistique est représentée dans la figure IV.4.

Faible pluviométrie	☐	S☐	Forte pluviométrie	☐	S☐
Type <i>Glochidion</i>	-0.207	0.041	Type <i>Mallotus</i>	0.191	0.043
<i>Melasto./Combretaceae</i>	-0.114	0.048	Type <i>Syzygium</i>	0.139	0.042
Type <i>Neonauclea</i>	-0.158	0.046	Spores triletes	0.114	0.039
Type <i>Maytenus</i>	-0.133	0.039	<i>Aglaia</i>	0.130	0.047
<i>Lagerstroemia</i>	-0.108	0.033	<i>Gordonia obtusa</i>	0.122	0.052
<i>Acalypha</i>	-0.070	0.025	<i>Aporosa</i>	0.079	0.066
<i>Bischofia javanica</i>	-0.084	0.033	Type <i>Calamus</i>	0.050	0.043
<i>Diospyros</i>	-0.087	0.036	Type <i>Croton</i>	0.048	0.042
Moraceae/ Urticaceae	-0.114	0.048	Type <i>Olea glandulifera</i>	0.045	0.041
<i>Dodonaea viscosa</i>	-0.070	0.030	<i>Gnetum ula</i>	0.067	0.068
Compositae type échiné	-0.072	0.032	Type <i>Piper</i>	0.008	0.032
Type <i>Lannea</i>	-0.035	0.043			

Tableau IV.2 : Coefficients de régression standardisés (☐) et moyennés sur 50 calibrations (S☐ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable pluviométrie annuelle.

Les taxons présentant une forte corrélation négative avec la pluviométrie annuelle (PANN, mm/an) sont considérés comme marqueurs de faibles précipitations (Figure IV.4). Ils représentent ici des arbres très abondants dans les forêts décidues, tels que *Haldina* (type *Neonauclea*), *Terminalia*, *Anogeissus* (Combretaceae), *Emblica* (type *Glochidion*), *Maytenus*, *Celastrus* (type *Maytenus*), *Lagerstroemia*, *Streblus* (Moraceae), *Dodonaea viscosa* et *Lannea*. Ils représentent aussi des arbres communs dans les formations sempervirentes et semi-sempervirentes, tels que *Diospyros*, *Bischofia javanica* (arbre décidu), *Glochidion*, *Antiaris*, *Artocarpus* (Moraceae), *Microtropis* (type *Maytenus*) et *Lagerstroemia*. Les taxons marqueurs de faibles pluviométries représentent aussi des herbacées telles que *Acalypha*, abondantes dans les régions sèches et les Composées *Ageratum*, *Bidens* et *Chromolaena* (pollen de type échiné) abondantes dans tous les types de formations.

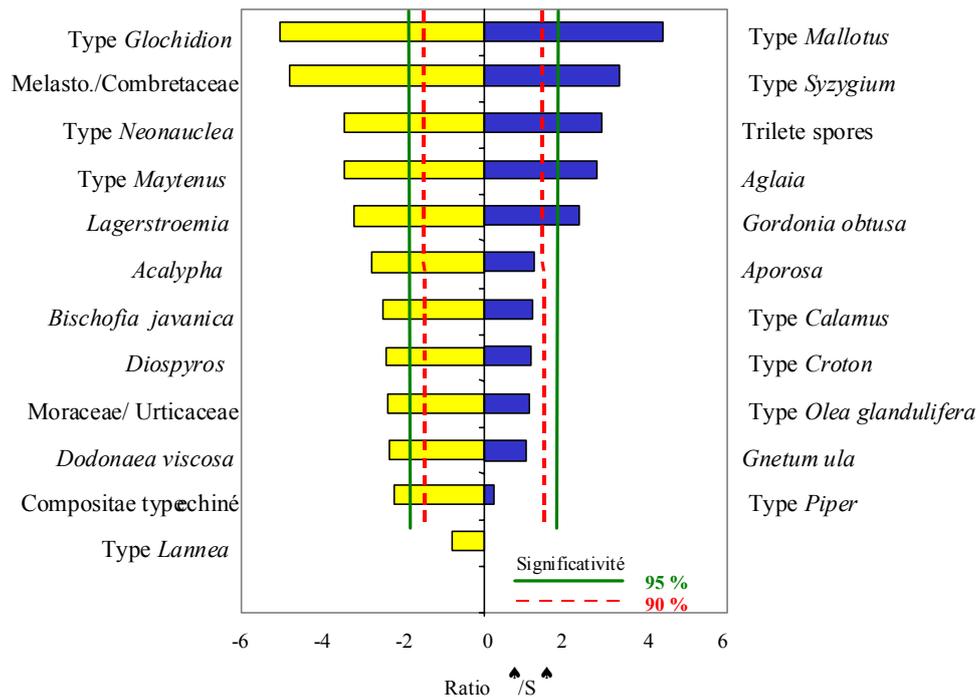


Figure IV.4 : Significativité statistique des 23 régresseurs de la pluviométrie annuelle, calculée à l'aide du ratio t/S et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.

Les taxons marqueurs ayant une forte corrélation positive avec la pluviométrie sont considérés comme des marqueurs de fortes précipitations. Ils représentent principalement des arbres abondants ou bien représentés dans les forêts sempervirentes de basse et moyenne altitude, tels que *Mallotus*, *Macaranga*, *Aglaia*, *Gordonia*, *Aporosa*, *Olea glandulifera*, ainsi que les palmiers *Areca* et *Pinanga* (type *Calamus*) et les lianes ou épiphytes *Calamus*, *Piper* et *Gnetum ula*. Les spores ptéridophytes trilètes ont également été identifiées comme marqueurs de forte pluviométrie. Nous avons choisi de garder parmi les régresseurs plusieurs taxons tels que *Aporosa*, *Calamus*, *Croton**, *Olea glandulifera*, *Gnetum ula* et *Piper**, bien que leur significativité statistique soit inférieure à 90% (Figure IV.4). En effet, on verra que ces taxons sont présents dans les spectres fossiles des sédiments marins auxquels nous appliquerons la fonction de transfert Pollen - Précipitation.

2.3. Résultats de la calibration et discussion

La calibration d'une fonction de transfert Pollen – Précipitation (dataset de 180 spectres et 23 taxons polliniques) donne de bons résultats. En effet, les coefficients de corrélation pour la calibration et la vérification sont forts avec des valeurs de $R_{\text{calibration}} = 0.86$ et $R_{\text{vérification}} = 0.81$.

Il faut remarquer que la présence de régresseurs non significatifs tels que *Gnetum ula* ou *Piper**, ne produit pas de biais majeurs lors de la calibration. A titre de vérification, nous avons en effet calibré une autre fonction sans les prendre en compte, mais en ajoutant *Cullenia exarillata*, *Grewia* et *Filicium decipiens* à la place de *Aporosa*, *Calamus**, *Croton**, *Olea glandulifera*, *Gnetum ula* et *Piper**, nous avons obtenu des coefficients de corrélations sensiblement supérieurs à ceux présentés ci-dessus ($R_{\text{calibration}} = 0.88$ et $R_{\text{vérification}} = 0.80$).

Les corrélations entre valeurs de pluviométries reconstruites (à partir des données polliniques) et valeurs de pluviométries observées (interpolées à partir du réseau météorologique) représentées dans la figure IV.5 illustrent une bonne fonction de transfert.

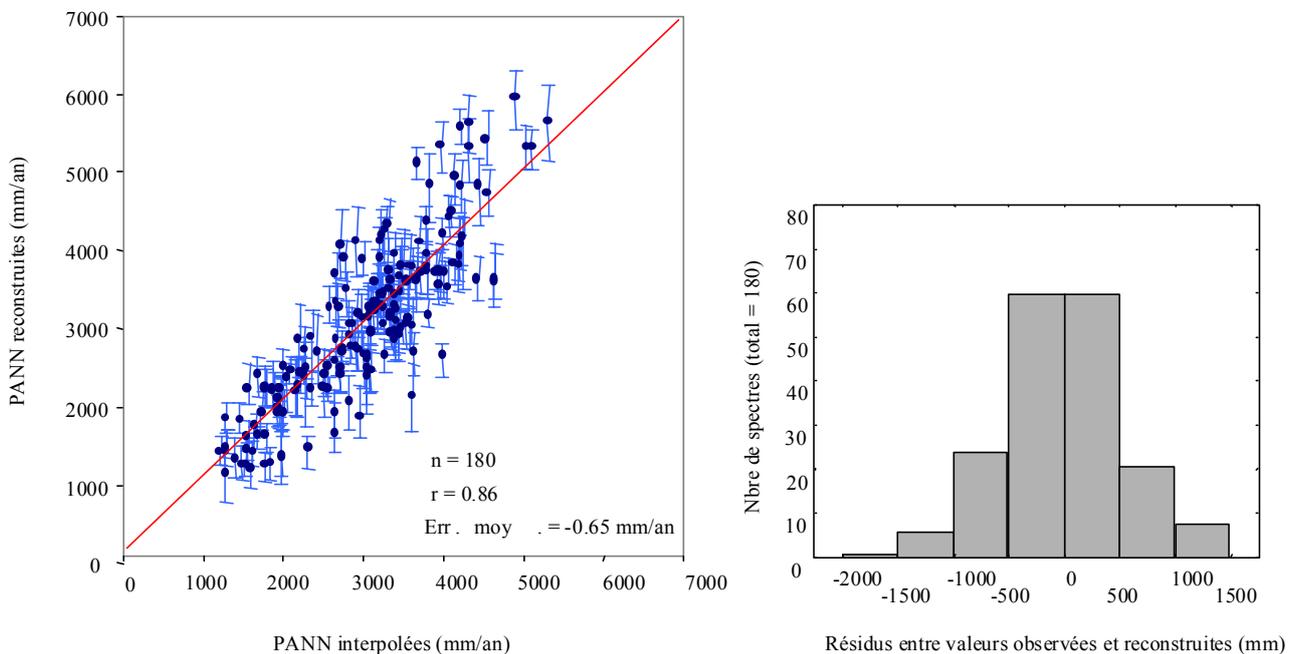


Figure IV.5 : Corrélation entre précipitations interpolées (observées) et précipitations reconstruites pour les 180 sites polliniques (précipitations moyennes annuelles, PANN, mm/an), et distribution des résidus.

L'histogramme des fréquences des résidus est symétrique (figure IV.5). Il montre que 90% des individus ont un résidu compris entre -1000 mm et $+1000$ mm et que dans 67% des cas le résidu est compris seulement entre -500 mm et $+500$ mm. L'analyse détaillée des résidus n'indique pas de tendance particulière. Il apparaît seulement que les plus fortes surestimations de pluviométrie (résidus < -1000 mm) sont obtenues pour les spectres provenant des savanes arborées et des forêts décidues sèches, tandis que les plus fortes sous-estimations (résidus $> +1000$ mm) sont obtenues pour certains spectres provenant de forêts denses de moyenne

altitude. Notons cependant que la fonction de transfert a tendance à surestimer les pluviométries supérieures à 4000 mm/an.

En conclusion, les forts coefficients de corrélation de calibration et de vérification obtenus, ainsi que la distribution des résidus (10% de cas seulement pour lesquels ils sont supérieurs à ± 1500 mm) et la valeur de l'erreur moyenne (-0.65 mm/an) indiquent que le modèle de prédiction est très satisfaisant et qu'il peut être appliqué à de nouvelles données.

3. Fonction de transfert POLLEN – SAISONNALITE des précipitations (E/PE)

3.1. Domaine d'application

Comme pour la pluviométrie, la mise au point une fonction de transfert Pollen – Saisonnalité des précipitations considère les 180 spectres modernes des Ghâts occidentaux à l'exclusion de ceux de haute altitude (coefficient d'humidité E/PE compris entre 50% et 100%, et bon échantillonnage des intervalles 55-75% et 85-100% -Figure II.10).

3.2. Taxons polliniques marqueurs

Par la méthode de la régression multiple, 39 taxons polliniques ont été identifiés comme marqueurs de la saisonnalité des précipitations, exprimée par le coefficient d'humidité E/PE (en %). La liste des marqueurs est donnée dans le Tableau IV.3. Leur significativité statistique est représentée dans la figure IV.6.

Les taxons polliniques présentant une forte corrélation négative avec le coefficient d'humidité E/PE, sont les marqueurs d'une forte saisonnalité (E/PE proche de 50%). Ces marqueurs tels que *Lagerstroemia*, *Haldina* (Type *Neonauclea*), *Xylia xylocarpa*, *Emblica* (Type *Glochidion*), *Schleichera oleosa*, *Anogeissus*, *Terminalia* (Combretaceae) représentent des arbres décidus communs et parfois très abondants dans les forêts décidues du Plateau de Mysore, là où la saison sèche s'étend de 4 à 8 mois (Pascal, 1986). *Olea dioica*, *Xantolis*, *Poeciloneuron*, *Holigarna*, *Syzygium*, *Aporosa* ont aussi été identifiés comme marqueurs d'une forte saisonnalité. Ils représentent des arbres communs aux forêts sempervirentes et semi-sempervirentes que l'on trouve dans les Ghâts sous des longueurs de saison sèche allant de 4 à 8 mois (Pascal, 1988). Parmi les marqueurs de forte saisonnalité notons aussi l'importance des herbacées telles que les Chenopodiaceae/Amaranthaceae, Caryophyllaceae, *Artemisia*, Poaceae et les Compositae (type échiné).

Fort coefficient d'humidité E/PE	☐	S☐	Faible coefficient d'humidité E/PE	☐	S☐
<i>Aporosa</i>	-0.018	0.026	<i>Acalypha</i>	0.103	0.029
<i>Artemisia</i>	-0.070	0.022	Apiaceae	0.058	0.019
<i>Caryota</i>	0.-170	0.029	<i>Dodonaea viscosa</i>	0.130	0.052
Caryophyllaceae	-0.025	0.026	<i>Elaeocarpus</i>	0.046	0.029
Cheno./Amaranthaceae	-0.114	0.024	Fabaceae	0.046	0.021
Compositae type échiné	-0.030	0.026	<i>Ficus</i>	0.122	0.029
<i>Holigarna</i>	-0.058	0.024	<i>Filicium decipiens</i>	0.115	0.033
<i>Lagerstroemia</i>	-0.140	0.022	<i>Isonandra</i>	0.063	0.022
Melasto./Combretaceae	-0.041	0.033	Lamiaceae	0.111	0.025
<i>Olea dioica</i>	-0.077	0.023	<i>Madhuca</i>	0.070	0.023
Poaceae	-0.055	0.028	<i>Myristica</i>	0.056	0.023
<i>Poeciloneuron</i>	-0.071	0.028	Spores trilete	0.094	0.024
<i>Schleichera oleosa</i>	-0.046	0.024	<i>Trema orientalis</i>	0.037	0.031
<i>Syzygium</i> type	-0.052	0.026	Type <i>Calamus</i>	0.034	0.033
Type <i>Glochidion</i>	-0.083	0.026	Type <i>Croton</i>	0.108	0.023
Type <i>Ixora</i>	-0.101	0.025	Type <i>Drypetes</i>	0.057	0.019
Type <i>Lannea</i>	-0.097	0.028	Type <i>Mallotus</i>	0.108	0.026
Type <i>Neonauclea</i>	-0.099	0.016	Type <i>Olea glandulifera</i>	0.063	0.035
<i>Xantolis tomentosa</i>	-0.057	0.019	Type <i>Piper</i>	0.072	0.027
<i>Xylia xylocarpa</i>	-0.079	0.019			

Tableau IV.3 : Coefficients de régression standardisés (☐) et moyennés sur 50 calibrations (S☐ = écart type) pour les taxons polliniques marqueurs de la variable coefficient d'humidité (E/PE, %).

Les taxons polliniques présentant une forte corrélation positive avec le coefficient d'humidité E/PE sont les marqueurs d'une faible saisonnalité (E/PE proche de 100%). Ces marqueurs, tels que *Calamus*, *Trema*, *Elaeocarpus*, *Olea glandulifera*, *Myristica*, *Piper*, *Ficus*, *Isonandra*, *Drypetes*, *Mallotus* représentent des arbres sempervirents communs, voir très abondants dans les forêts sempervirentes et sempervirentes humides des Ghâts occidentaux. Ils représentent aussi des arbres tels que les Fabaceae, *Dodonaea viscosa*, *Madhuca*, *Filicium decipiens* que l'on trouve plutôt dans les forêts décidues de la région de Tirunelveli dans la pointe sud de la péninsule indienne (Ramesh *et al.*, 1998). Ces marqueurs représentent aussi des plantes herbacées telles que les Apiaceae, *Acalypha*, et les Lamiaceae. Notons que les spores trilètes de ptéridophytes ont aussi été identifiées comme des marqueurs d'une faible saisonnalité des précipitations.

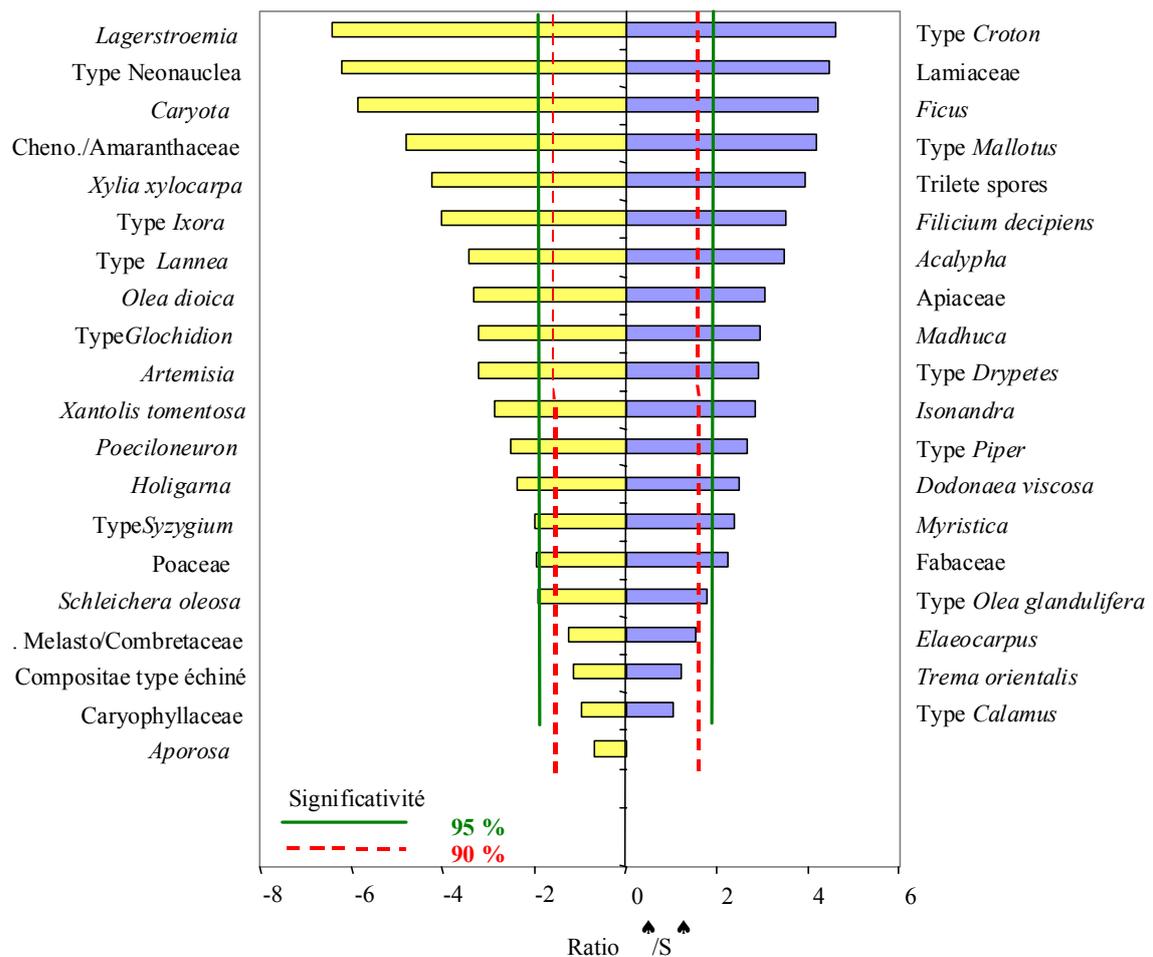


Figure IV.6 : Significativité statistique des 39 régresseurs du coefficient d'humidité E/PE, calculée à l'aide du ratio R/S et de la fonction de répartition de la loi normale réduite.

3.3. Résultats de la calibration et discussion

La calibration d'une fonction de transfert Pollen – Saisonnalité des précipitations sur la base d'un dataset de 180 spectres polliniques actuels et à l'aide de 39 taxons polliniques marqueurs donne de bons résultats : les coefficients de corrélation pour la calibration et la vérification sont forts avec des valeurs de $R_{\text{calibration}} = 0.94$ et $R_{\text{vérification}} = 0.89$.

Les corrélations entre valeurs de E/PE interpolées et valeurs reconstruites à l'aide des pollens sont présentées dans la Figure IV.7. Le fort coefficient de corrélation obtenu sur la calibration met en évidence la bonne adéquation entre les valeurs de E/PE interpolées et les valeurs de E/PE reconstruites à l'aide des pollens. Cependant on remarquera que notre modèle de reconstruction tend à sous-estimer le coefficient d'humidité lorsque celui-ci est compris entre 70 et 80%, alors qu'il le surestime lorsque qu'il est supérieur à 80%.

La distribution des résidus présentée dans la Figure IV.7, n'est pas centrée autour de zéro. Elle montre que 55% des reconstructions présentent des résidus compris entre -2 et $+4\%$ et que 28% des reconstructions présentent des résidus compris entre -8 et -2% . L'analyse des résidus met en évidence que E/PE interpolé et résidus sont fortement corrélés ($r = +0.38$). Plus E/PE est proche de 100%, plus les reconstructions sont surestimées. L'analyse combinée des résidus de la Figure IV.7 montre aussi que lorsque E/PE est compris entre 70% et 80%, les reconstructions sont sous-estimées.

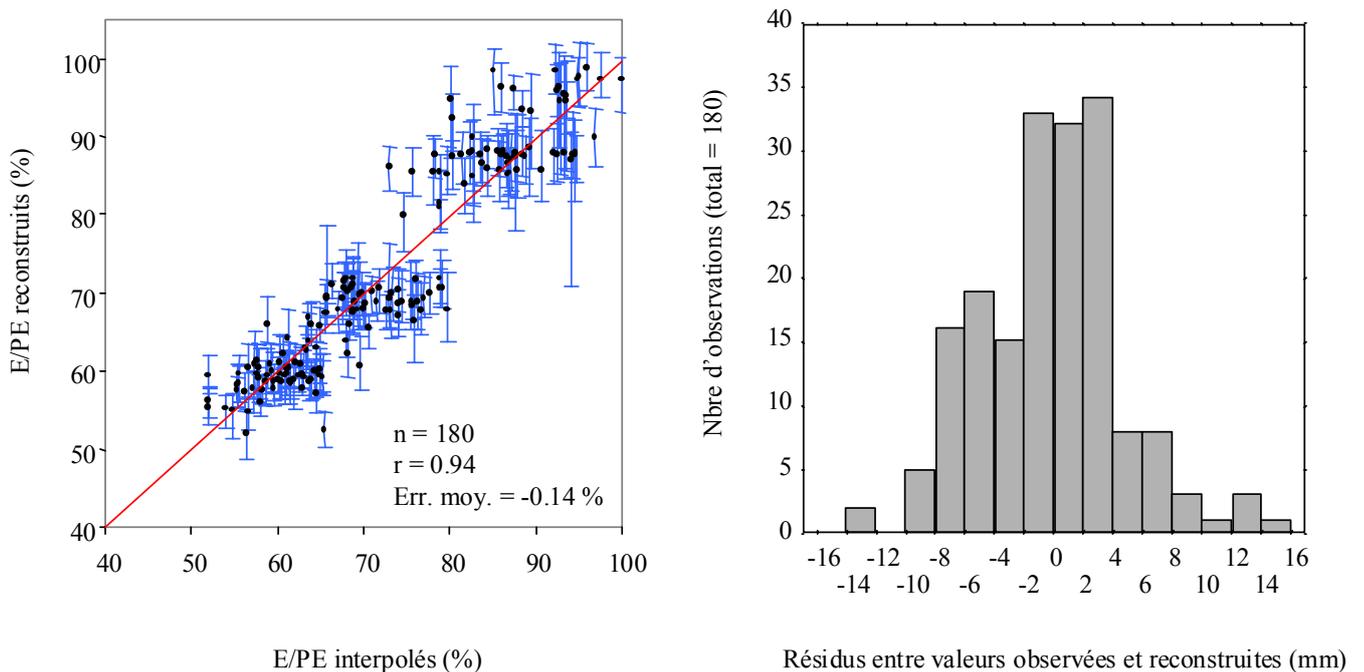


Figure IV.7 : Corrélation entre E/PE interpolé et E/PE reconstruit pour les 180 sites polliniques (Coefficient d'humidité, E/PE, %), et distribution des résidus.

Les plus forts coefficients d'humidité E/PE sont rencontrés dans l'extrême sud de la péninsule indienne entre 8° et 9°N , aussi bien du côté Ouest des Ghâts que du côté Est (région de Tirunelveli). Dans la mesure où sous un même coefficient d'humidité compris entre 95% et 100%, se trouvent des forêts sempervirentes de composition floristique différente (Ramesh *et al.*, 1998), il n'est pas surprenant d'obtenir de forts résidus entre E/PE interpolé et E/PE reconstruit par les pollens, puisque à une certaine gamme de E/PE correspondent deux associations polliniques différentes. On constate que cet argument explique aussi les forts résidus obtenus pour les E/PE compris entre 70 et 80%, car sous cette gamme particulière de E/PE on trouve à la fois les forêts sempervirentes de la zone côtière entre 11° et 12°N et les forêts décidues du Plateau de Mysore. On a donc obtenu de forts résidus pour les gammes de E/PE auxquelles correspondent des signatures polliniques différentes.

En conclusion, pour la reconstruction du coefficient d'humidité E/PE, les forts coefficients de corrélation obtenus sur la calibration et la vérification, et la faible valeur de l'erreur moyenne permettent de considérer notre modèle de reconstruction de E/PE comme très satisfaisant et applicable à de nouvelles données. D'un point de vue physiologie des plantes, E/PE est important, puisque c'est un coefficient adapté à l'estimation du stress hydrique subit par les plantes. Il est utilisé dans les modèles de Biome

En conclusion, avec les données polliniques modernes il est possible d'obtenir par régression multiple, une quantification valable des moyennes annuelles de température, pluviométrie et de la saisonnalité des précipitations dans la région des forêts tropicales soumises au climat de la mousson indienne. Nous disposons de trois fonctions de régression pour reconstruire à partir des pollens certains paramètres du climat de mousson. Nous présentons ci-après l'application de ces trois fonctions, à la reconstruction du climat.

Conclusion : application à des spectres fossiles

Les études palynologiques sur des tourbières du sud de l'Inde et quelques analyses de $\delta^{13}\text{C}$ ont été interprétées qualitativement comme indiquant des conditions climatiques continentales plus froides et plus sèches durant la période glaciaire dans le sud de l'Inde (Gupta and Prasad, 1985; Sukumar *et al.*, 1993; Sutra *et al.*, 1997 ; Vasanthi, 1988). Dans le cadre du projet PMIP (Palaeoclimate Modelling Intercomparison Project), ces anomalies thermiques (température moyenne du mois le plus froid, MTCO) ont été estimées à -6.8°C pour l'Inde (Farrera *et al.*, 1999).

Une première fonction de transfert Pollen – Climat a montré dans la région désertique du Rajasthan, Nord de l'Inde que la pluviométrie annuelle aurait doublée par rapport à sa valeur actuelle entre 10,500 et 3,500 ans BP (Bryson and Swain, 1981; Singh *et al.*, 1990). L'analyse palynologique de sédiments marins provenant de deux carottes marines collectées en mer d'Arabie suggère une intensification des pluies de mousson d'été vers 11,000 ans B.P et une phase aride correspondant à une diminution des pluies durant la période 22,000-18,000 ans BP (Van Campo, 1986).

Dans le but de contribuer à la compréhension des changements paléoclimatiques globaux, on se propose d'appliquer ici, les fonctions de transfert Pollen - Climat à des séries polliniques fossiles disponibles dans la région soumise au climat de mousson.

- **Carottes en Mer d'Arabie (SK128A-30 et -31)**

La première série de données fossiles provient de deux carottes sédimentaires marines prélevées à l'ouest de la côte indienne entre 13° et 15°N (Tableau IV.4, Figure IV.8). Elles font actuellement l'objet de la thèse de doctorat de C.N Prabhu. Les comptages polliniques de 24 niveaux pour la carotte SK128A-31 et de 22 niveaux pour la carotte SK128A-30, effectués dans le cadre d'une collaboration (Département de Géologie Marine de l'Université de Mangalore, Inde ; l'Institut Français de Pondichéry, Inde ; CEREGE), ont pu être utilisés ici. Le rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sur les foraminifères et les datations au ^{14}C étant en cours d'étude, l'application des fonctions de transfert Pollen - Climat ne dispose pas encore de la stratigraphie qui fera l'objet d'une publication ultérieure.

Carottes marines	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Profondeur d'eau (m)	Nb de niveaux analysés pour les pollens	Niveaux datés (encours)
SK128A-31	15°02'	71°41'	2000	24	22-24 cm 46-48 cm 114-116 cm
SK128A-30	13°16'	71°00'	2400	22	14-16 cm

Tableau IV.4 : Localisation des carottes marines SK128A-30 et -31 en Mer d'Arabie et détails concernant les analyses polliniques effectués et les datations.

Figure IV.8 : Localisation géographique des carottes sédimentaires marines en Mer d'Arabie.

Les sédiments marins sont susceptibles de contenir les pollens des végétations présentes dans les Ghâts occidentaux. Les grandes rivières qui drainent les bassins versants des Ghâts occidentaux à ces latitudes sont nombreuses du fait des fortes pluviométries et des pentes abruptes. Entre 15°30'N et 14°30'N, les rivières Mandovi, Zuvari, Kalinadi et Bedri prennent leur source aux environs de 800 m. Elles traversent les forêts semi-sempervirentes de basse et moyenne altitude des Ghâts, où la pluviométrie annuelle dépasse 5000 mm/an à certains endroits comme Anshi. Entre 14°15'N et 12°30'N, les rivières Tadri, Sharavati, Kolor, Halda, Sita, Netravati et Payaswami prennent leur source beaucoup plus haut, dans les monts Babudangiri vers 1800 m d'altitude. Elles traversent les forêts sempervirentes de basse (0-800 m), moyenne (800-1400) et haute altitude (1400-1800 m) et des zones où la pluviométrie annuelle dépasse aussi parfois 5000 mm/an (e. g. Agumbe). Les analyses de susceptibilité magnétique montrent que ce sont les rivières qui constituent les principales sources d'apport sédimentaires (Prabhu C.N, *en préparation*) et vraisemblablement celle des apports polliniques.

A 15°N et 13°N, la température moyenne annuelle est de 28°C au niveau de la mer et de 16.5°C à 1800 m d'altitude ; le gradient thermique étant de 0.6°C/100 m. Les montants de pluviosité annuelle varient entre 2500 et 5000 mm/an. Ils sont supérieurs à 5000 mm/an sur les crêtes des Ghâts vers Anshi (15°N) et Agumbe (13°30'N) (Figure I.5). La longueur de la saison sèche est de 4 à 6 mois à 13°N et supérieure à 6 mois à 15°N (Pascal, 1982). Les valeurs du coefficient d'humidité E/PE sont de 60-70% à 13°N et de 50-60% à 15°N.

Résultats

Lors de l'analyse pollinique des sédiments des carottes marines SK128A-30 et -31, 64 taxons polliniques et 2 types de spores ont été identifiés. Le nombre de pollens comptés par niveau (Rhizophoraceae et spores exclues) est compris entre 85 et 600. Les diagrammes polliniques correspondants aux carottes marines SK128A-30 et -31 sont présentés dans les Figures IV.9 et IV.10. Ils montrent l'abondance relative de taxons polliniques ou de groupes de taxons.

Les pourcentages des pollens ont été calculés sur la base de sommes polliniques différentes. Le pourcentage des Rhizophoraceae représentant la mangrove a été calculé sur la somme pollens des végétations de zones sèches + pollens de Rhizophoraceae. Les pourcentages de pollens représentant les plantes aquatiques *Typha* et *Eriocaulon* ont été calculés sur la somme des pollens des végétations de zones sèches + pollens de *Typha* et *Eriocaulon*. Les pourcentages des spores ont été calculés sur la somme des pollens + spores.

Les taxons polliniques dominants sont les Chenopodiaceae/Amaranthaceae, les Poaceae et les Cyperaceae. Les Chenopodiaceae sont des plantes xérophytiques ou halophytiques. Elles peuvent provenir de l'intérieur des terres ou du littoral (Van Campo, 1983). Dans le contexte actuel des Ghâts occidentaux, les Chenopodiaceae/Amaranthaceae sont bien représentées dans les spectres actuels provenant des forêts décidues humides (cf. Chapitre III). Les Poaceae suggèrent la présence de savanes ou de formations décidues (Barboni and Bonnefille, submitted). Dans la région des Ghâts occidentaux, les Cyperaceae sont abondantes dans les spectres polliniques provenant des forêts de haute altitude (sholas) (Bonnefille *et al.*, 1999) et dans les formations décidues sèches (Barboni and Bonnefille, submitted). Elles sont aussi très abondantes autour des marécages.

Les taxons polliniques identifiés dans les spectres fossiles des deux carottes marines ont été regroupés en associations (Tableau IV.5). L'attribution des taxons aux groupes a été effectuée d'après nos études statistiques sur la pluie pollinique actuelle continentale entre 8° et 16°N (Chapitre III). Par conséquent, les regroupements polliniques présentés dans le tableau IV.5 contiennent deux types d'information : une information phytogéographique (phénologique, botanique) et une information climatique précisée au chapitre III. Le regroupement diffère sensiblement de celui des 2 carottes marines proches du site étudié (Van Campo, 1986), bien que les noms des groupes soient très proches.

Mangrove	Décidu humide	Semi-sempervirent
Rhizophoraceae	<i>Caesalpinia</i> *	<i>Aglaia</i>
	[Cheno./Amaranthaceae]	<i>Aporosa</i>
	<i>Glochidion</i> *	<i>Canthium</i> *
Décidu sec	<i>Grewia</i>	<i>Celtis</i>
<i>Acalypha</i>	<i>Lagerstroemia</i>	<i>Flacourtia</i>
<i>Azadirachta</i>	Lamiaceae	<i>Schleichera oleosa</i>
<i>Dodonea viscosa</i>	<i>Lannea</i> *	<i>Syzigium</i>
<i>Justicia</i>	Malvaceae	
Mel./Combretaceae	<i>Maytenus</i> *	
<i>Phoenix</i>	<i>Neonauclea</i> *	Non attribués
[Poaceae]	<i>Phyllanthus</i>	Arecaceae
	<i>Xylia xylocarpa</i>	<i>Borassus</i>
		Caryophyllaceae
Aquatiques		<i>Cocculus</i>
<i>Eriocaulon</i>	Introduits / Cultivés	[Cyperaceae]
<i>Typha</i>	<i>Cocos</i>	Rubiaceae
	<i>Casuarina</i>	
	<i>Pinus</i>	
	<i>Xanthium</i>	

Sempervirent	Sempervirent humide	Sempervirent d'altitude (shola)
Apiaceae	<i>Gnetum ula</i>	Compositae fenestratae
<i>Artemisia</i>	<i>Madhuca</i>	<i>Rapanea</i>
<i>Calamus</i> *	<i>Mallotus</i> *	Rosaceae
<i>Caryota</i> *	<i>Pandanus</i>	Rutaceae
Compositae echinate	Piperaceae	Sapotaceae
<i>Croton</i> *	Rhamnaceae	<i>Symplocos</i>
<i>Drypetes</i> *	<i>Tetrameles nudiflora</i>	
Fabaceae	<i>Toona ciliata</i>	
<i>Holoptelea integrifolia</i>		
<i>Ixora</i> *		
<i>Ligustrum</i>		
Moraceae/Urticaceae		
<i>Olea glandulifera</i> *		
<i>Randia</i> *		
<i>Securinega</i> *		
<i>Tinospora cordifolia</i>		
<i>Trema orientalis</i>		

Tableau IV.5 : Regroupement des taxons polliniques fossiles des carottes marines SK128A-30 et -31, d'après les analyses statistiques de la pluie pollinique actuelle des différents types de végétations de l'Inde du Sud, discutées au Chapitre III.

Diagrammes polliniques fossiles

Les spectres polliniques fossiles contiennent des associations polliniques représentatives de la végétation locale : la mangrove du littoral, et de la végétation régionale : les forêts des Ghâts occidentaux. Les diagrammes polliniques illustrent les variations d'abondance de ces groupes et permettent de déterminer les zones polliniques en l'absence de stratigraphie.

Pour la carotte SK128A-31 (Figure IV.9), la pollen- zone E de la base est caractérisée par une dominance des Poaceae et des Chenopodiaceae/Amaranthaceae, compatible avec une attribution à une période glaciaire. Les apports polliniques seraient essentiellement éoliens et venus du Nord. Après une période de relative stabilité (pollen -zone D), un maximum d'éléments sempervirents associés à un signal de décidus secs (dus aux Melastomataceae/Combretaceae) caractérise la pollen -zone C. Après un pic de sempervirent humide (pollen -zone B), la présence des Introduits/Cultivés signale vraisemblablement l'Holocène. Un test statistique préliminaire d'analyse hiérarchique (non contraint par la stratigraphie) a bien identifié la zone C.

SK128A-31

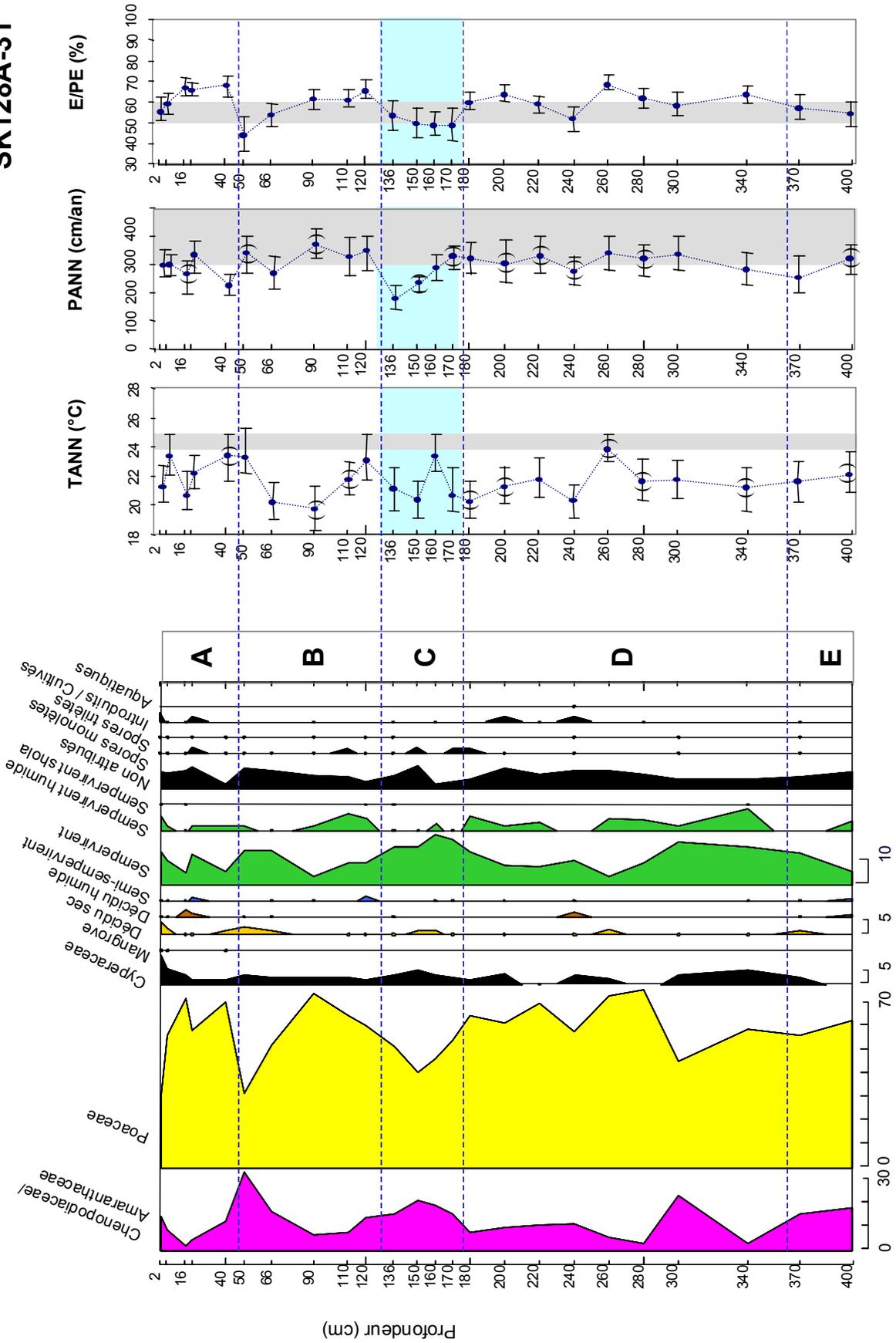


Figure IV.9 : Diagramme pollinique synthétique et valeurs moyennes annuelles reconstruites de température (TANN, °C), pluviométrie (PANN, cm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) pour la carotte marine SK128A-31.

SK128A-30

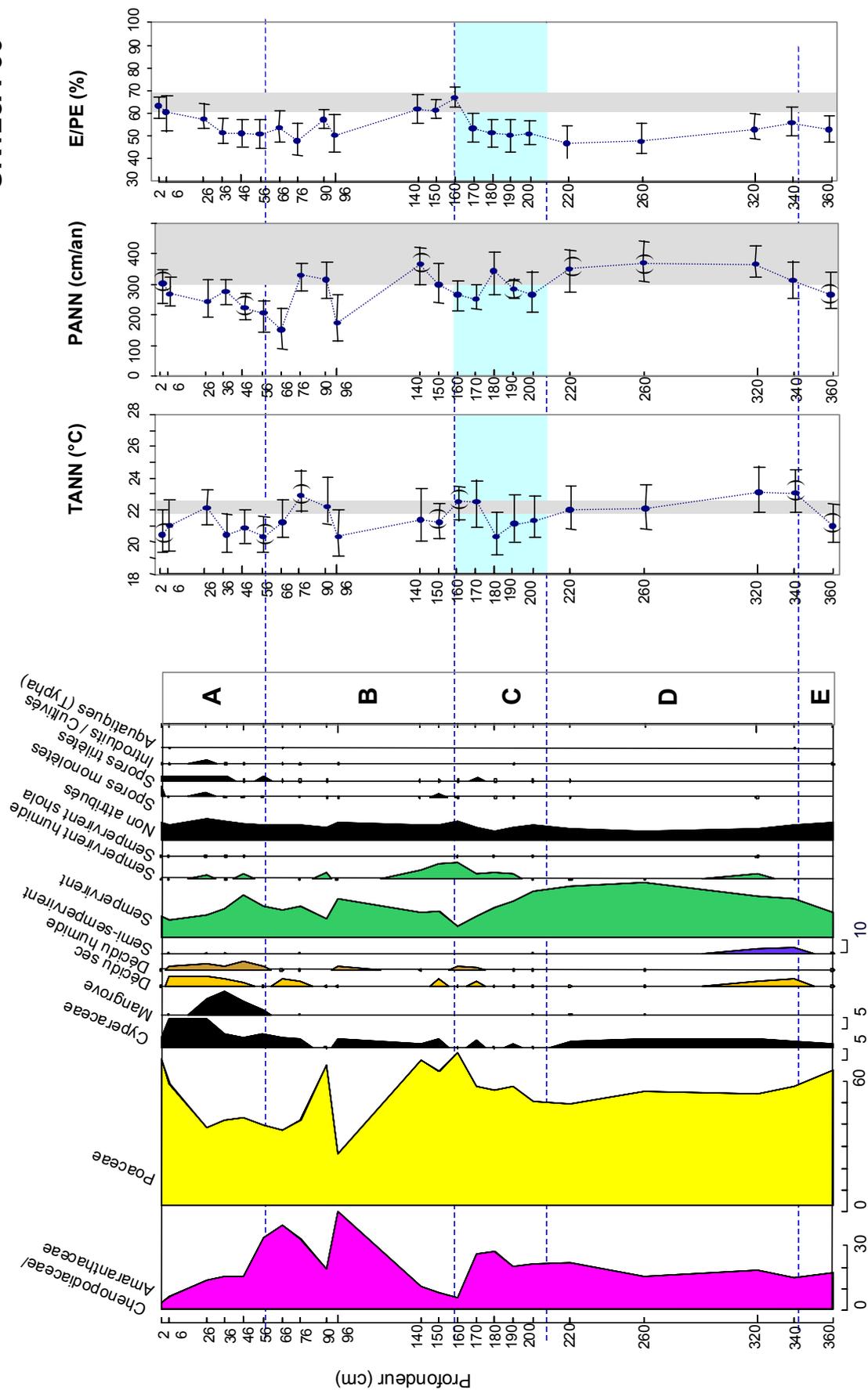


Figure IV.10 : Diagramme pollinique synthétique et valeurs moyennes annuelles reconstruites de température (TANN, °C), pluviométrie (PANN, cm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) pour la carotte marine SK128A-30.

Pour la carotte SK128A-30, les différentes pollens –zones sont illustrées sur la figure IV.10. La correspondance des pollens –zones entre les carottes SK128A-30 et 31 n'apparaît évidente que pour les pollens -zones C et D. Le test de classification hiérarchique individualise principalement la zone C. La pollen –zone A de la carotte SK128A-30 indique la présence exclusive d'une phase de développement de mangrove. Cette caractéristique significative de l'ensemble de la période de l'Holocène, avec le maximum à 11,000 ans BP (Van Campo, 1986), confirmerait l'attribution de cette pollen –zone à la période Holocène. La base des carottes étudiées antérieurement était de 15 à 17,000 ans à 2 mètres de profondeur. Celle-ci correspond dans la carotte SK128A-30 à la pollen –zone C, à laquelle on peut, en première estimation, attribuer un âge glaciaire.

Les résultats de l'application des fonctions de transfert pour TANN, PANN et E/PE

Les fonctions de transfert élaborées dans les sections précédentes (sections 1, 2 et 3 de ce chapitre) ont été appliquées aux données fossiles des carottes marines SK128A-30 et –31.

Au cours de la procédure d'application des fonctions de transfert, les sommes polliniques sur la base desquelles ont été calculés les pourcentages des taxons marqueurs de la température, de la pluviométrie et du coefficient d'humidité E/PE sont comprises entre 40 et 500 grains.

La présentation des résultats des reconstructions nécessite une référence à l'Actuel. Pour estimer la température actuelle, une moyenne a été effectuée entre la température moyenne au niveau de la mer et la température moyenne du relief le plus haut à 15°N et 13°16'N pour tenir compte des apports par les rivières. A la latitude de 15°N, les plus hauts reliefs sont à 800 m, et la température moyenne à cette altitude est d'environ 23°C. A la latitude de 13°N, les plus hauts reliefs sont à 1800 m, et la température moyenne à cette altitude est de 16.5°C. La température au niveau de la mer étant de 28°C en moyenne, la température moyenne actuelle à 15°N a donc été estimée à 25.5°C. Elle a été estimée à 22°C à la latitude 13°N.

Pour estimer la valeur actuelle de la pluviométrie, je me suis référée aux valeurs de PANN interpolées. A 15°N et 13°N, la pluviométrie annuelle est de 3000 mm/an en moyenne, mais elle varie entre 3000 et 5000 mm/an. Dans la mesure où il n'a pas été démontré qu'il existe un lien direct entre la pluviométrie et l'altitude (ou un autre paramètre) dans les Ghâts, j'ai préféré considérer comme valeur actuelle la gamme de pluviométries supérieures à 3000 mm/an.

Pour estimer la valeur actuelle du coefficient d'humidité E/PE, je me suis basée sur la variabilité spatiale de ce paramètre qui est directement fonction de la latitude entre 11°30'N et au-delà de 16°N. Les valeurs actuelles de E/PE sont comprises entre 50% et 60% à 15°N et comprises entre 60% et 70% à 13°N. Dans l'attente de précisions stratigraphiques, je présente

ici une tentative d'interprétation. Les résultats sont présentés en parallèle aux données polliniques sur les figures IV.9 et IV.10.

Sur l'ensemble de la carotte SK128A-31 à 15°N, les températures annuelles reconstruites sont toujours inférieures de 2°C aux valeurs actuelles. Cette situation ne se retrouve pas à 13°N, où les températures reconstruites restent relativement stables autour de la valeur actuelle de 22°C. Cette différence de 2°C ne peut pas être expliquée par la position latitudinale des carottes. En effet le gradient continental de variation de la température annuelle a été déterminé de 1°C pour 8° de variation latitudinale. Il faudrait supposer une augmentation des contrastes thermiques latitudinaux en période glaciaire 8 fois supérieure à l'actuel pour expliquer ce décalage. Ce qui semble irréaliste.

La reconstruction de la pluviométrie montre un schéma intéressant. A 15°N, la pluviométrie annuelle reste dans les limites des valeurs actuelles (>3000 mm/an), sauf pour la pollen –zone C, où une diminution de moitié est clairement mise en évidence. A 13°N, les valeurs de PANN, inférieures à celles actuelles, caractérisent non seulement la pollen –zone C, mais aussi toute la partie supérieure. On pourrait conclure à une opposition relative sud/nord (entre 15° et 13°) du comportement de la pluviométrie. L'Holocène inférieur aurait été plus sec (1500-2000 mm/an) à 13°N qu'à 15°N, où les valeurs de PANN demeurent autour de 3000 mm/an.

La reconstruction du coefficient d'humidité E/PE, qui traduit en quelque sorte la saisonnalité des précipitations confirme cette opposition sud/nord. La saisonnalité (corrélée au nombre de jours secs) reste semblable à l'actuel à 15°N (SK128A-31), tandis qu'elle est plus marquée au sud (13°N, SK128A-30), ceci sur l'ensemble de la période temporelle représentée dans la carotte. Pour la pollen –zone C, le schéma est le même dans les deux carottes. Une diminution de la pluie est accompagnée d'une plus longue saison sèche (1,5 fois).

Dans la répartition actuelle des pluies de la mousson d'été, le démarrage de la mousson indienne s'effectue pratiquement à la latitude de Cochin (8°45'N). Au sud de cette latitude subsiste une zone plus sèche ne recevant pas les fortes pluies de la mousson d'été (PANN <2000 mm/an) (Figure I.5).

Pour expliquer le décalage sud/nord dans le passé pour la période récente (Holocène inférieur ?) sèche au sud et humide au nord, on peut invoquer un déplacement latitudinal du front de mousson. Cette hypothèse, réaliste au vu des simulations climatiques globales fera l'objet d'investigations plus approfondies dans le cadre d'un post doctorat que j'effectuerai prochainement à l'Institut Max Planck de Jena, Allemagne.

En conclusion : Nous avons présenté ici une première reconstruction climatique pour l'Inde du sud en utilisant la méthode des fonctions de transfert Pollen – Climat, qui permettent de produire des estimations quantitatives à partir des spectres polliniques des changements de la mousson indienne. Malgré son caractère préliminaire dû au fait que les données fossiles font l'objet d'une étude en cours tout comme la stratigraphie (thèse de C.N. Prabhu), les fonctions de transfert obtenues produisent des reconstructions climatiques cohérentes. En effet, on a obtenu des précipitations plus faibles associées à une saisonnalité plus marquée et à une baisse de température, pour la période qui pourrait correspondre au Maximum Glaciaire. Ultérieurement, à l'aide notamment de la courbe isotopique, nous serons en mesure d'interpréter également le signal pollinique de la mangrove qui est enregistré dans une des carottes, et qui semble caractériser l'Holocène supérieur.

- **Carottes au large de la Papouasie -Nouvelle Guinée (MD97-2134)**

Le faible nombre de sites fossiles en Inde du Sud m'a poussé à rechercher des sites en Asie du Sud-Est et en Océanie où la flore actuelle présente bon nombre d'éléments communs avec la flore de l'Inde du Sud. Les forêts tropicales des Ghâts occidentaux appartiennent en effet à l'empire Indo-Malais qui est limité au nord par la chaîne himalayenne et au sud par l'océan Indien. De plus, les nombreuses analyses palynologiques effectuées en région australasienne montrent que la plupart des taxons polliniques représentatifs des forêts tropicales de basse et moyenne altitude sont également des taxons marqueurs des forêts tropicales de l'Indonésie (Hope and Tulip, 1994; Van der Kaars *et al.*, 2000; Van der Kaars, 1991; Van der Kaars and Dam, 1995), de la Papouasie-Nouvelle Guinée (Hope, 1976) et du Queensland en Australie (Crowley *et al.*, 1994; Kershaw, 1994; Kershaw and Bulman, 1994; Kershaw and Nix, 1988; Moss and Kershaw, 2000). Les taxons polliniques représentatifs des forêts tropicales australasiennes présentent de plus, une distribution dans l'espace climatique qui est proche, voir similaire à celle de l'Inde du Sud (Kershaw and Nix, 1988; Moss and Kershaw, 2000).

Nous présentons ici une application préliminaire aux 2 carottes marines prélevées au cours de la mission IMAGES III – IPHIS (Juin 1997, campagne océanographique dirigée par Luc Beaufort). Il s'agit de la MD97-2141 prélevée dans la Mer de Sulu et de la MD97-2134 prélevée dans le Golfe de Nouvelle Guinée (Figure IV.11). On pensait que ces deux carottes localisées près des côtes, seraient susceptibles de contenir des pollens. Cependant après traitement chimique des sédiments marins, il s'est relevé que seuls certains niveaux de la carotte MD97-

2134 (prélevée sous une profondeur d'eau de 760 m) présentaient des concentrations suffisantes en grains de pollen pour pouvoir être analysés. La faible concentration en grains de pollen de la carotte MD97-2141 s'explique peut-être par l'absence de grandes rivières et de bassins versant abrupts dans les îles de la mer de Sulu.

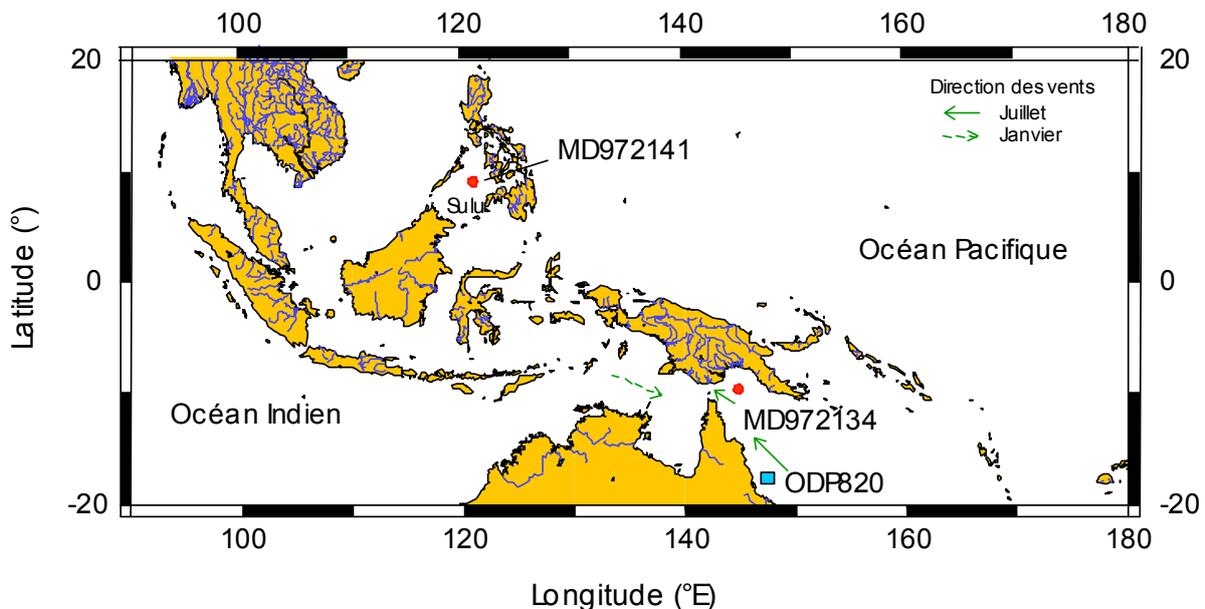


Figure IV.11 : Carte de localisation géographique de la carotte MD97-2134.

Nous avons donc choisi la carotte MD97-2134, située au large de la côte sud de la Papouasie-Nouvelle Guinée au niveau de l'embouchure du fleuve Fly. Cette carotte qui est localisée dans la Western Pacific Warm Pool ($9^{\circ}54'S - 114^{\circ}39'E$, Figure IV.11), montre un fort taux de sédimentation. Elle est donc susceptible de fournir un enregistrement à très haute résolution des variations paléoclimatiques (de Garidel, *com. pers.*). De plus, des études palynologiques effectuées sur une carotte marine prélevée au large de la côte Nord-Est australienne (site ODP 820) ont montré que 1) les pollens des forêts tropicales du Queensland (Australie) sont bien enregistrés dans les sédiments marins, 2) les spectres polliniques fossiles des carottes marines reproduisent bien les changements de végétation liés aux changements climatiques, 3) les spectres polliniques fossiles des carottes marines, bien qu'ils donnent une représentation plus régionale de la végétation, produisent un signal pollinique comparable à ceux fournis par des spectres fossiles de carottes continentales (Kershaw, 1994; Kershaw *et al.*, 1993).

Afin de tester une application de nos fonctions de transfert sur la carotte MD97-2134, nous avons compté les pollens de 8 niveaux : 2 niveaux holocènes (stade isotopique 1), 2 niveaux au

Maximum Glaciaire (stade isotopique 2) et 4 niveaux pendant la période glaciaire (stade isotopique 3). Ceci afin de quantifier l'amplitude des changements glaciaire/interglaciaire.

Lors de l'analyse du contenu pollinique des 8 échantillons marins fossiles cités, seulement deux niveaux se sont révélés vraiment riches en pollens marqueurs du climat. Ces deux niveaux correspondent aux profondeurs 859-860 cm (455 pollens) et 860-862 cm (512 pollens) qui datent de la période glaciaire (âge estimé à 34000 ans BP environ, d'après la courbe de $\delta^{18}\text{O}$ et un modèle d'âge préliminaire - L. Beaufort, T. de Garidel & F. Bassinot, *com. pers.*). Les comptages de ces deux niveaux marins ont été poussés jusqu'à obtenir un minimum de 100 pour les pollens marqueurs de la température, des précipitations et du coefficient d'humidité E/PE.

Résultats

L'analyse des 2 niveaux fossiles 859-860 cm et 860-862 cm de la carotte MD97-2134, a permis d'identifier 70 taxons polliniques et 2 types de spores. Parmi ces 70 taxons polliniques, 16 sont restés indéterminés. Les 54 autres taxons ont pu être identifiés à différents niveaux taxonomiques allant de la famille à l'espèce. Parmi ces 54 taxons identifiés, seulement 5 taxons correspondent à des plantes n'existant pas dans la végétation naturelle en Inde du Sud. Il s'agit des types *Nothofagus dombei*, *Nothofagus obliqua* (Fagaceae), *Phyllocladus* (Phyllocladaceae), présents uniquement dans les forêts de moyenne et haute altitude en Indonésie et en Nouvelle-Guinée (Soepadmo, 1972). Ces trois genres sont abondants dans les forêts de moyenne et haute montagne à une altitude allant de 1500 et 3200 m (Johns, 1982), i.e. là où la température moyenne annuelle est comprise entre 17.5° et 11.5°C (Flenley, 1996). *Eucalyptus* et *Casuarina*. Les genres *Nothofagus* et *Phyllocladus* sont *Eucalyptus* et *Casuarina* n'appartiennent pas à la végétation naturelle de l'Inde, où ils ont été introduits récemment. Si l'on considère que les 16 taxons indéterminés correspondent à des plantes typiques de la végétation australasienne, on a donc 49 taxons qui sont communs aux spectres polliniques modernes de l'Inde du Sud et l'Australasie. Les proportions des 49 taxons communs à l'Inde et à l'Australasie totalisent 65% de l'information pollinique obtenue.

On peut donc dire que *qualitativement* notre dataset pollinique contient 70% de l'information et que *quantitativement* il contient 65% de l'information nécessaire à l'interprétation des spectres fossiles de la carotte MD97-2134. Cependant, les taxons polliniques fossiles ne sont pas tous des marqueurs identifiés du climat. Ainsi on a pu identifier seulement **13** taxons qui sont utilisés pour reconstruire la température (TANN) (soit 48% de l'information) ; **14** pour la pluviométrie (PANN) (61% de l'information) et **24** pour reconstruire le coefficient d'humidité E/PE (61% de l'information).

Les valeurs de température moyenne annuelle reconstruites pour les niveaux 859-860 cm et 860-862 cm (environ 34,000 ans) de la carotte MD97-2134 sont de l'ordre de $23^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$. Les estimations de pluviométrie annuelle moyenne sont de 3800 mm/an, et les valeurs du coefficient d'humidité sont de 71.8% pour le niveau 859-860 m et de 88.7% pour le niveau 860-862 cm (Figure IV.12).

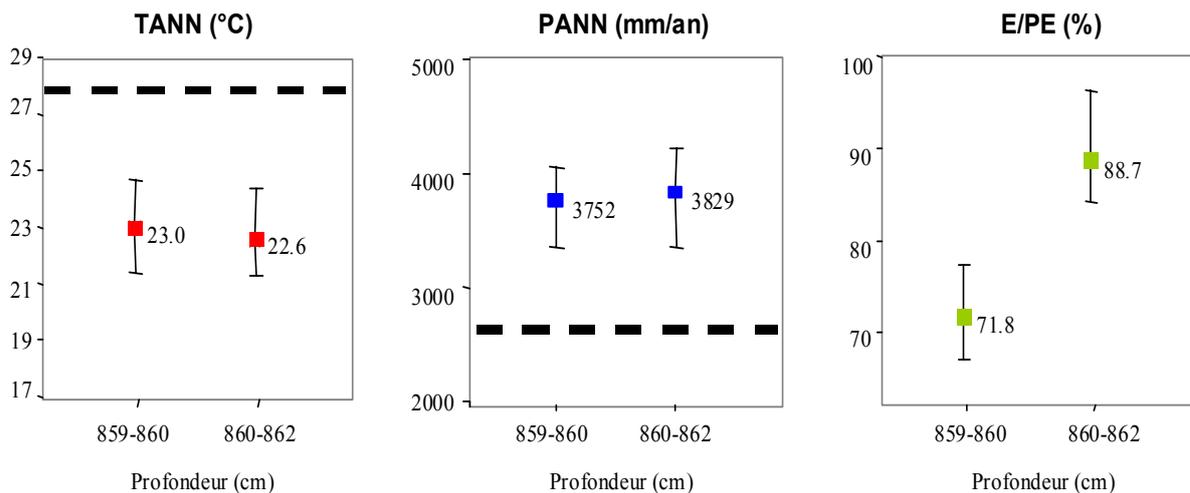


Figure IV.12 : Estimation des valeurs de température moyenne annuelle (TANN, °C), pluviométrie annuelle (PANN, mm/an) et du coefficient d'humidité (E/PE, %) obtenues par les fonctions de transfert Pollen - Climat, pour les niveaux sédimentaires 859-860 cm et 860-862 cm de la carotte MD97-2134.

Discussion

- *Température*

Les valeurs de température reconstruite par les pollens fossiles de la carotte MD97-2434 apparaissent cohérentes avec celles de la région tropicale. Par rapport à la valeur de 28.5°C de la température moyenne annuelle des eaux de surface (Flenley, 1996), les valeurs reconstruites indiquent une température de 5°C plus froide. Sachant que les taxons « froids » de la végétation locale, i.e. *Podocarpus*, *Nothofagus*, *Phyllocladus* (25% du total pollen) ne sont pas pris en compte dans la calibration, ceci est une valeur minimale vraisemblablement sous-estimée.

L'ajustement d'une fonction de transfert Pollen - TANN nécessiterait 1) d'intégrer des spectres polliniques actuels de Nouvelle Guinée au dataset de calibration de la fonction de transfert Pollen - Température et, 2) d'avoir des valeurs de TANN reconstruites pour la période actuelle.

Néanmoins, cet essai limité montre une bonne cohérence avec les estimations obtenues en Nouvelle Guinée à partir de l'analyse combinée de différents proxy terrestres (pollens, évidences géomorphologiques, macro-restes), qui indiquent une diminution de température de 6° à 8°C par rapport à l'actuel pour la période glaciaire datant d'avant 34,000 ans BP (Bowler *et al.*, 1976; Peterson *et al.*, 1979; Rind and Peteet, 1985; Webster, 1978). Nos estimations de température pour cette période contribuent à alimenter la polémique concernant les changements de température dans cette région du globe. En effet, les estimations obtenues par les données terrestres indiquent de fortes diminutions de températures de l'ordre de 6° à 9°C, tandis que les données planctoniques marines indiquent une diminution de seulement 2°C par rapport à l'actuel (Anderson *et al.*, 1989; CLIMAP Project Members, 1976; CLIMAP Project Members, 1981 ; Crowley, 2000; Farrera *et al.*, 1999).

- *Pluviométrie annuelle*

A 34,000 ans, nous avons reconstruit une valeur de pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 3800 mm/an. En Nouvelle Guinée, la pluviométrie actuelle varie de 1500-2000 mm/an à 3000 mm/an en fonction de l'altitude croissante (Van der Kaars, 1991). Nos estimations de PANN sont dans ces ordres de grandeur. Cependant pour la période glaciaire, nos estimations de PANN sont en contradiction avec les études palynologiques continentales qui suggèrent un climat plus sec qu'à l'actuel en Australasie (Farrera *et al.*, 1999; Van der Kaars, 1991) et même une diminution de 75% au nord-est de l'Australie (Kershaw, 1994). La forte pluviométrie annuelle pour la période glaciaire reconstruite par la fonction de transfert calibrée sur un dataset de l'Inde du sud pourrait s'expliquer par le fait que certains taxons marqueurs ne soient pas représentatifs des mêmes intervalles de pluviométrie en Inde du sud et en Nouvelle Guinée. Nous n'avons pas pu le vérifier pour tous les marqueurs, mais il se trouve que les forts contributeurs, tels que *Macaranga* (type *Mallotus*) et *Mallotus* sont abondants dans la végétation sous les mêmes gammes de pluviométrie en Inde et dans le nord-est de l'Australie (pluviométrie annuelle moyenne d'environ 2000 mm/an) (Moss and Kershaw, 2000). La présence en proportions remarquables (>5%) de taxons tels que *Elaeocarpus*, *Mallotus*, *Macaranga*, *Piper* et *Gnetum*, dans les niveaux 859-860 cm et 860-862 cm de la carotte MD97-2134 indique bien la présence d'une forêt tropicale, qui en Inde serait présente sous une pluviométrie annuelle >2000 mm/an.

Nos valeurs de pluviométrie sont peut-être surestimées. Cependant il est intéressant de remarquer que c'est durant la période glaciaire que le taux de sédimentation est le plus important dans la carotte MD97-2134. Un fort taux de sédimentation indique que les apports fluviaux terrigènes étaient plus importants à cette époque. L'augmentation des apports

terrigenes peut s'expliquer par 1) une pluviométrie plus importante sur les bassins versants, et/ou 2) une saisonnalité des précipitations plus marquée qui favorise un plus fort colluvionnement.

Nos valeurs du coefficient d'humidité E/PE, qui prend en compte la saisonnalité des précipitations et la capacité de rétention en eau des sols indique une faible saisonnalité à cette époque (environ 34000 ans BP). En effet, si l'on compare avec l'Inde du Sud, des valeurs de E/PE de 70% et 88% correspondent à des longueurs de saisons sèches de 4 et 2 mois respectivement. Bien que nous ne puissions discuter plus en détails ces résultats, il semble qu'au vu des valeurs de saisonnalité obtenues, c'est l'hypothèse d'une forte pluviométrie qui est à préférer pour expliquer le fort taux de sédimentation durant la période glaciaire.

Conclusion : Les valeurs de température et de pluviométrie reconstruites ici pour deux niveaux glaciaires d'une carotte du Golfe de Nouvelle Guinée ($\Delta T = -5^\circ\text{C}$), à l'aide du dataset pollinique discuté dans ce travail, sont dans des intervalles climatiques du même ordre que celles obtenues par d'autres études quantitatives pour l'Australasie ($\Delta T = -6-8^\circ\text{C}$) (Bowler *et al.*, 1976; Peterson *et al.*, 1979; Rind and Peteet, 1985; Webster, 1978). Ceci montre le bien fondé d'utiliser un dataset de l'Inde pour tenter de reconstruire le climat dans une autre région tropicale soumise au climat de mousson comme l'Australasie. Cependant notre valeur de température reconstruite pour le refroidissement glaciaire est une sous-estimation, car elle ne prend pas en compte les marqueurs froids de la Nouvelle Guinée présents dans les niveaux fossiles. Le but *in fine* de ce travail étant la mise au point méthodologique, il suffit maintenant d'élargir le dataset en y intégrant les données d'Australasie pour une reconstruction plus précise.

Comme montré pour l'Inde du sud, les spectres polliniques contiennent un signal climatique qui permet de reconstruire la saisonnalité des précipitations ce qui, appliqué dans toute la zone tropicale de mousson permettrait de déterminer si l'intensification de la mousson s'est traduit par une intensification des montants de pluviosité ou par une saisonnalité moins marquée.

CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

Par une approche stratégique de l'échantillonnage et de l'analyse des données polliniques en fonction des types de végétations et des gradients climatiques existant en Inde du sud, nous avons tenté dans ce travail de recherche, d'apporter des éléments de réponse à un certain nombre de préoccupations :

- Déterminer les taxons polliniques caractéristiques des forêts tropicales de l'Inde, sachant que les marqueurs botaniques ne sont pas représentés dans la pluie pollinique actuelle ;
- Déterminer les seuils bioclimatiques définissant le domaine d'existence des types de végétations, qui sont marqués dans la pluie pollinique actuelle, et ce en vue d'une modélisation réaliste du couvert végétal de l'Inde tropicale ;
- Déterminer les taxons polliniques marqueurs du climat tropical de la mousson indienne, en vue de reconstructions climatiques quantifiées ;

L'analyse du signal pollinique de 180 échantillons de surface de sol, collectés dans les forêts des Ghâts occidentaux entre 8° et 16°N, a montré qu'à partir non seulement de la composition mais aussi de la richesse taxonomique, de la proportion de taxons arborés et de taxons sempervirents représentés dans la pluie pollinique, on peut d'identifier les grands types de végétations correspondant à la classification botanique en vigueur (Pascal, 1988).

De plus, notre étude a montré que les différences de composition de la pluie pollinique s'expliquent principalement par trois contraintes climatiques majeures subies par la végétation. Ces contraintes sont la température du mois le plus froid (MTCO), la pluviométrie annuelle (PANN) et le coefficient d'humidité (E/PE, rapport de l'évapotranspiration réelle versus l'évapotranspiration potentielle). En particulier, nous retiendrons que MTCO = 15°C, MTCO = 20°C, PANN = 2500 mm/an, PANN = 1500 mm/an, E/PE = 75% et E/PE = 65% déterminent des changements de composition botanique et pollinique importants. Ces seuils climatiques qui déterminent la distribution spatiale actuelle des types de végétation en Inde du sud ne sont pas pour le moment considérés dans les modèles de Biome. Les résultats obtenus dans ce travail vont donc contribuer à des modélisations plus réalistes du couvert végétal de l'Inde tropicale, proche des cartographies de la végétation résultant du travail de terrain des botanistes. Notre étude apporte donc des résultats importants dans le domaine de la modélisation globale du couvert végétal.

L'analyse du signal pollinique de la végétation actuelle de l'Inde tropicale a permis d'identifier des taxons polliniques présentant une sensibilité particulière aux composantes du climat et d'obtenir par la méthode de la régression multiple linéaire, une quantification valable des moyennes annuelles de température, de pluviométrie et de la saisonnalité des précipitations dans la région des forêts tropicales soumises au climat de mousson. En appliquant ces fonctions de transfert Pollen – Climat, nous avons obtenu pour l'Inde du sud, des précipitations plus faibles associées à une saisonnalité plus marquée et à une baisse de température, pour la période qui pourrait correspondre au Maximum Glaciaire. Les valeurs de température reconstruites pour deux niveaux glaciaires d'une carotte dans le Golfe de Nouvelle Guinée ($\Delta T = -5^\circ\text{C}$) sont, elles aussi cohérentes et se trouvent être du même ordre que celles obtenues par d'autres études quantitatives pour l'Australasie. Notre étude, dont le but *in fine* était la mise au point méthodologique, apporte donc des éléments fiables et adaptés à des reconstructions quantifiées du climat tropical de la mousson.

L'approche mise en œuvre pour analyser le signal pollinique de la végétation actuelle des Ghâts occidentaux et du climat de la mousson indienne, a fourni les clés permettant de traduire les informations contenues dans un spectre pollinique (actuel ou fossile) en terme de conditions climatiques (présentes ou passées).

Il nous paraît donc important maintenant de participer à la mise au point du modèle de Biome adapté à la modélisation de la végétation du sous-continent indien. Utiliser la même approche lors du traitement de l'ensemble des données polliniques de l'Inde, disponibles dans la littérature, notamment celles concernant les végétations subtropicales et tempérées du nord de l'Inde, devrait contribuer à augmenter la précision du modèle de Biome à reproduire une distribution spatiale réaliste de la végétation actuelle et donc être en mesure de reconstruire des distributions spatiales réalistes des végétations passées et futures.

En parallèle à la mise au point du modèle, approfondir l'étude palynologique de sédiments anciens serait un apport considérable à la connaissance des impacts terrestres liés aux variations du système climatique de la mousson en Asie.

Références bibliographiques

1. An, Z., Porter, S. C., Weijian, Z., Yanchou, L., Donahue, D. J., Head, M. J., Xihuo, W., Jianzhang, R., and Hongbo, Z. (1993). Episode of strengthened monsoon climate of Younger Dryas Age on the loess plateau of central China. *Quaternary Research* **39**, 45-54.
2. An, Z. S., Kukla, G. J., Porter, S. C., and Xiao, J. (1991). Magnetic susceptibility evidence of Monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130,000 years. *Quaternary Research* **36**, 29-36.
3. Ananthkrishnan, R., and Soman, M. K. (1988). The onset of the southwest monsoon over Kerala: 1901-1980. *Journal of Climatology* **8**, 283-296.
4. Anderson, D. M., Prell, W. L., and Barratt, N. J. (1989). Estimates of sea surface temperature in the Coral Sea at the last glacial maximum. *Paleoceanography* **4**, 615-627.
5. Anupama, K., Ramesh, B. R., and Bonnefille, R. (2000). Modern pollen rain from the Biligirirangan-Melagiri hills of southern Eastern Ghats, India. *Review of Palaeobotany and Palynology* **108**, 175-196.
6. Arora, R. K. (1965). Ecological notes on the Coorg District, Western Ghats. *Indian Forester* **91**, 722-742.
7. Arora, R. K. (1966). The vegetation of South Kanara District, Western Ghats, India. III. Evergreen Type. *Journal of the Indian Botanical Society* **45**, 304-316.
8. Arrhenius, O. (1921). Species and area. *Journal of Ecology* **9**, 95-99.
9. Ashton, P. S. (1964). Ecological studies in the mixed Dipterocap forests of Brunei State. *Oxford Forestry Memoirs* **25**, 75 pp.
10. Bagnouls, F., and Gaussen, H. (1953). "Saison sèche et indice xérothermique. Document pour les cartes des productions végétales.", Toulouse.
11. Balsco, F. (1971). Aspects of the Flora, and Ecology of Savannas of the South Indian Hills. *Journal, Bombay Natural History Society* **67**, 522-534.
12. Bansod, S. D., Singh, S. V., and Kripalani, R. H. (1991). The relationship of monsoon onset with subsequent rainfall over India. *International Journal of Climatology* **11**, 809-817.
13. Barboni, D., and Bonnefille, R. (submitted). Precipitation signal in modern pollen rain from tropical forests, South India. *Review of Palaeobotany and Palynology*.
14. Barboni, D., Bonnefille, R., Prasad, S., and Ramesh, B. R. (submitted). Modern pollen rain from tropical forests related to seasonal monsoon climate, southwest India. *Journal of Vegetation Science*.
15. Benzécri, J. P. (1973). "L'analyse des données. II." Dunod, Paris.
16. Bera, S. K., and Gupta, H. P. (1992). Correlation between pollen spectra and modern vegetation of Anamalai Hills, Tamil Nadu. *Geophytology* **22**, 239-245.
17. Bhalme, H. N., and Mooley, D. A. (1980). *Monthly Weather Review* **108**, 1197.
18. Birks, H. J. B. (1985). Recent and possible future mathematical developments in quantitative palaeoecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **50**, 107-147.
19. Birks, H. J. B., and Gordon, A. D. (1985). "Numerical methods in Quaternary pollen analysis." Academic Press, London.
20. Birks, H. J. B., and Line, J. M. (1992). The use of rarefaction analysis for estimating palynological richness from Quaternary pollen-analytical data. *The Holocene* **2**, 1-10.

21. Blasco, F. (1971). "Montagnes du Sud de l'Inde: Forêts, Savanes, Ecologie." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
22. Bonnefille, R., Anupama, K., Barboni, D., Pascal, J.-P., Prasad, S., and Sutra, J.-P. (1999). Modern pollen spectra from tropical South India and Sri Lanka, altitudinal distribution. *Journal of Biogeography* **26**, 1255-1280.
23. Bonnefille, R., Buchet, G., Friis, I., Ensermu Kelbessa, and Mohammed, M. U. (1993). Modern pollen rain on an altitudinal range of forests and woodlands in South West Ethiopia. *Opera Botanica* **121**, 71-84.
24. Bonnefille, R., Riollet, G., and Buchet, G. (1991). Nouvelle séquence pollinique d'une tourbière de la crête Zaïre-Nil (Burundi). *Review of Palaeobotany and Palynology* **67**, 315-330.
25. Bourgeon, G. (1988). Esquisses sur les grandes zones de sols du sud de l'Inde. *Cahier de l'ORSTOM, Série Pédologie* **24**, 303-328.
26. Bowler, J. M., Hope, G. S., Jennings, J. N., Singh, G., and Walker, D. (1976). Late Quaternary climates of Australia and New Guinea. *Quaternary Research* **6**, 359-394.
27. Bryson, R. A., and Swain, A. M. (1981). Holocene variations of monsoon rainfall in Rajasthan. *Quaternary Research* **16**, 135-145.
28. Cain, S. A., Castro, D. O., Pires, J. M., and Silva, N. T. D. (1956). Application of some physiological techniques to Brazilian rain forest. *Am. J. Bot.* **43**, 911-941.
29. Caner, L. (2000). "Les sols humifères des "Hautes terres" du massif des Nilgiri en Inde du Sud." Unpublished Thèse de Doctorat thesis, Henri Poincaré - Nancy I.
30. Caudill, M., and Butler, C. (1992). "Understanding Neural networks." The MIT Press Cambridge, Cambridge, Massachusetts.
31. Chalié, F., Edorth, T. M., Bonnefille, R., Guiot, J., and Roeland, J. C. (1990). Signal de la pluviosité dans les données polliniques actuelles du Togo. *C. R. Acad. Sci. Paris, Serie II* **311**, 893-899.
32. Champion, H. G., and Seth, S. K. (1968). "A revised survey of the forest types of India." Manager Govt. of India press, Nasik.
33. Chauhan, M. S. (1994). Modern pollen/vegetation relationship in the topical deciduous Sal (*Shorea robusta*) forests in District Sidhi, Madhya Pradesh. *Journal of Palynology* **30**, 165-175.
34. Clarkes, I. D., and Fontes, J. (1990). Paleoclimatic reconstruction in northern Oman based on carbonates from hyperalkaline ground-waters. *Quaternary Research* **33**, 320-336.
35. Claussen, M., and Esch, M. (1994). Biomes computed from simulated climatologies. *Climate Dynamics* **9**, 235-243.
36. Clemens, S., and Prell, W. (1990). Interhemispheric moisture transport in the Indian Ocean summer monsoon: data-model and model-model comparisons. *Paleoceanography* **7**, 633-643.
37. Clemens, S., and Prell, W. (1991). Late Quaternary forcing of Indian Ocean summer monsoon winds: A comparison of Fourier model and general circulation model results. *J. Geophys. Res.* **96**, 22683-22700.
38. Clemens, S., Prell, W., Murray, D., Shimmield, G., and Weedon, G. (1991). Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature* **353**.
39. CLIMAP Project Members. (1976). The surface of the ice age Earth. *Science* **191**, 1131-1137.

40. CLIMAP Project Members. (1981). Seasonal reconstruction of the earth's surface at the last glacial maximum. *Geol. Soc. Amer. Map and Chart Series*.
41. COHMAP, M. (1988). Climatic change of the last 18,000 years: Observations and model simulations. *Science* **241**, 1043-1052.
42. Critchfield, H., J., (1983). "General Climatology." Prentice-Hall, INC., New Jersey.
43. Crowley, G. M., Grindrod, J., and Kershaw, A. P. (1994). Modern pollen deposition in the tropical lowlands of northeast Queensland, Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology* **83**, 299-327.
44. Crowley, T. J. (2000). CLIMAP SSTs re-revisited. *Climate Dynamics* **16**, 241-255.
45. de Menocal, P. B., and Rind, D. (1993). Sensitivity of Asian and African climate to variations in seasonal insolation, glacial ice cover, sea surface temperature and asian orography. *Journal of Geophysical Research* **98**, 7265-7287.
46. de Noblet, N., Braconnot, P., Joussaume, S., and Masson, V. (1996). Sensitivity of simulated Asian and African summer monsoons to orbitally induced variations in insolation 126, 115 and 6 kBP. *Climate Dynamics* **12**, 589-603.
47. Duplessy, J. C. (1982). Glacial to interglacial contrasts in the northern Indian Ocean. *Nature* **295**, 494-498.
48. Efron, B. (1979). *Annals of Statistics*. **7**, 1-26.
49. Efron, B. (1983). Estimating the error rate of a prediction rule : improvement on cross-validation. *Journal of the American Statistical Association* **78**, 316-331.
50. Faegri, and Iversen. (1989). "Textbook of Pollen Analysis." .
51. FAO/UNESCO. (1974). Soil map of the world. F.A.O., Paris.
52. Farrera, I., Harrison, S. P., Prentice, I. C., Ramstein, G., Guiot, J., Bartlein, P. J., Bonnefille, R., Bush, M., Cramer, W., von Grafenstein, U., Holmgren, K., Hooghiemstra, H., Hope, G., Jolly, D., Lauritzen, S. E., Ono, Y., Pinot, S., Stute, M., and Yu, G. (1999). Tropical climates at the Last Glacial Maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake-levels and geochemistry. *Climate Dynamics* **15**, 823-856.
53. Flenley, J. R. (1996). Problems of the Quaternary on mountains of the Sunda-Sahul region. *Quaternary Science Review* **15**, 549-555.
54. Gadgil, S., and Joshi, N. (1983). Climatic clusters of the Indian region. *Journal of Climatology* **3**, 47-63.
55. Gamble, J. S. (1916-1935). "Flora of the Presidency of Madras." , London.
56. Ganesh, T., Ganesan, M., Devy, S., Davidar, P., and Bawa, K. S. (1996). Assessment of plant biodiversity at a mid-elevation evergreen forest of Kalakad-Mundanthurai Tiger Reserve, Western Ghats, India. *Current Science* **71**, 379-391.
57. Gasse, F., and 12 others. (1991). A 13000-year climate record from western Tibet. *Nature* **353**, 742-745.
58. Gasse, F., Ledee, V., Massault, M., and Fontes, J. (1989). Water-level fluctuations of lake Tanganyika in phase with oceanic changes during the last glaciation and deglaciation. *Nature* **342**, 57-59.
59. Gasse, F., and Van Campo, E. (1994). Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. *Earth Planetary Science Letter* **126**, 435-456.
60. Ghate, U., Joshi, N. V., and Gadgil, M. (1998). On the patterns of tree diversity in the Western Ghats of India. *Current Science* **75**, 594-603.

61. Gillepsie, R., Street-Perrott, F. A., and Switsur, R. (1983). Post-glacial arid episodes in Ethiopia have implications for climate prediction. *Nature* **306**, 680-683.
62. Gimaret-Carpentier, C. (1999). "Analyse de la biodiversité à partir d'une liste d'occurrences d'espèces : nouvelles méthodes d'ordination appliquées à l'étude de l'endémisme des Ghâts occidentaux.", Université Claude Bernard - Lyon II.
63. Gleason, H. A. (1922). On the relation between species and area. *Ecology* **3**.
64. Guinet, P. (1962). "Pollens d'Asie tropicale." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
65. Guiot, J. (1987). Late Quaternary climatic change in France estimated from multivariate pollen time series. *Quaternary Research* **28**, 100-118.
66. Guiot, J. (1990). "Quantification des changements climatiques : méthodes et programmes." PNEDC.
67. Guiot, J., Cheddadi, R., Prentice, I. C., and Jolly, D. (1996). A method of biome and land surface mapping from pollen data: Application to Europe 6000 years ago. *Palaeoclimates* **1**, 311-324.
68. Guiot, J., Keller, T., and Tessier, L. (1995). Relational Database in dendroclimatology and New Non-Linear Methods to analyse the Tree Response to Climate and Pollution. Tree Rings from the Past to the Future. In "International Workshop on Asian and Pacific Dendrochronology.", pp. 17-23.
69. Gunnell, Y. (1997). Relief and climate in South Asia: the influence of the Western Ghats on the current climate pattern of Peninsular India. *International Journal of Climatology* **17**, 1169-1182.
70. Gupta, H. P., and Bera, S. K. (1996). Silent Valley: A correlation between pollen spectra and vegetation. *Palaeobotanist* **43**, 139-144.
71. Gupta, H. P., and Prasad, K. (1985). The vegetational development during 30,000 years B.P. at Colgrain, Ootacamund, S. India. *Journal of Palynology* **21**, 174-187.
72. Gupta, H. P., and Yadav, R. R. (1992). Interplay between pollen rain and vegetation of Tarai-Bhabar in Kumaon Division, U. P., India. *Geophytology* **21**, 183-189.
73. Haxeltine, A., and Prentice, I. C. (1996). BIOME3 : An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles* **10**, 693-709.
74. Hooker, J. D. (1872-1897). "Flora of British India." .
75. Hope, G. S. (1976). The vegetational history of Mt. Wilhelm, Papua New Guinea. *Journal of Ecology* **64**, 627-661.
76. Hope, G. S., and Tulip, J. (1994). A long vegetation history from lowland Irian Jaya, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **109**, 385-398.
77. Huang, T. C. (1972). "Pollen flora of Taiwan." National Taiwan Univ., Botany Dept. Press., Taiwan.
78. Hurlbert, S. H. (1971). The non-concept of species diversity : a critique and alternative parameters. *Ecology* **52**, 577-586.
79. IPCC. (1995). "Climate change 1995-impacts, adaptations and mitigation: contribution of working group II to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change." Cambridge University Press, Cambridge.
80. Jarvis, D. I. (1993). Pollen evidence of changing holocene monsoon climate in Sichuan Province, China. *Quaternary Research* **39**, 325-337.

81. Johns, R. J. (1982). Plant zonation. In "Biogeography and Ecology of New Guinea (Monogr. Biol., 42)." (J. L. Gressitt, Ed.), pp. 309-330. Junk, The Hague.
82. Jolly, D., and Bonnefille, R. (1992). Histoire et dynamique du marécage tropical de Ndurumu (Burundi), données polliniques. *Review of Palaeobotany and Palynology* **75**, 133-151.
83. Jolly, D., Bonnefille, R., and Roux, M. (1994). Numerical interpretation of a high resolution Holocene pollen record from Burundi. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **109**, 357-370.
84. Jolly, D., Burq, S., Bonnefille, R., and Roux, M. (1996). Représentation pollinique de la forêt dense humide du Gabon, tests statistiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* **322**, 63-70.
85. Joussaume, S., Taylor, K. E., Braconnot, P., Mitchell, J. F. B., Kutzbach, J. E., Harrison, S. P., Prentice, I. C., Broccoli, A. J., Abe-Ouchi, A., Bartlein, P. J., Bonfils, C., Dong, B., Guiot, J., Herterich, K., Hewitt, C. D., Jolly, D., Kim, J. W., Kislow, A., Kitoh, A., Loutre, M. F., Masson, V., McAvaney, B., McFarlane, N., de Noblet, N., Peltier, W. R., Peterschmitt, J. Y., Pollard, D., Rind, D., Royer, J. F., Schlesinger, M. E., Syktus, J., Thompson, S., Valdes, P., Vettoretti, G., Webb, R. S., and Wyputta, U. (1999). Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). *Geophysical Research Letters* **26**, 859-862.
86. Keller, T. (1999). "Variabilité climatique interannuelle quantifiée à partir de la densité et des isotopes stables de la cellulose du bois.", Aix-Marseille III.
87. Keller, T., Guiot, J., and Tessier, L. (1997). Climatic effect of atmospheric CO₂ doubling on radial tree growth in southeastern France. *Journal of Biogeography* **24**, 857-864.
88. Kershaw, A. P. (1994). Pleistocene vegetation of the humid tropics of northeastern Queensland, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **109**, 399-412.
89. Kershaw, A. P., and Bulman, D. (1994). The relationship between modern pollen samples and environment in the humid tropics region of northeastern Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology* **83**, 83-96.
90. Kershaw, A. P., McKenzie, G. M., and McMinn, A. (1993). A quaternary vegetation history of northeastern Queensland from pollen analysis of ODP site 820. *Proc. ODP, Sci. Results* **133**, 107-114.
91. Kershaw, A. P., and Nix, H. A. (1988). Quantitative palaeoclimatic estimates from pollen data using bioclimatic profiles of extant taxa. *Journal of Biogeography* **15**, 589-602.
92. Khoshoo, T. N. (1995). Census of India's biodiversity Tasks ahead. *Current Science* **69**, 14-17.
93. Kraus, E. B. (1977). *Monthly Weather Review* **105**, 1009.
94. Kulkarni, A., and Kripalani, R. H. (1998). Rainfall patterns over India: Classification with fuzzy c-means method. *Theoretical Applied Climatology* **59**, 137-146.
95. Kutzbach, J. E. (1981). The early Holocene: Climate experiment with the earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science* **214**, 59-61.
96. Kutzbach, J. E. (1987). The changing pulse of the monsoon. In "Monsoons." (J. S. Fein, and P. L. Stephens, Eds.). John Wiley & Sons, Washington, DC.
97. Kutzbach, J. E., Guetter, W. F., Ruddiman, W. F., and Prell, W. L. (1989). Sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West. *Journal of Geophysical Research* **94**, 18393-18407.

98. Kutzbach, J. E., and Street-Perrott, F. A. (1985). Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kyr BP. *Nature* **317**, 130-134.
99. Labroue, L., Legris, P., and Viart, M. (1965). Bioclimats du sous-continent Indien, pp. 1-32. Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
100. Lamb, H. H. (1977). Climatic history and the Future. In "Climate: Present, Past and Future.", pp. 835. Methuen, London.
101. Leemans, R., and Cramer, W. (1991). The IIASA Climate database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid. International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg.
102. Legris, P., and Meher-Homji, V. M. (1977). Phytogeographic outlines of the hill ranges of peninsular India. *Tropical Ecology* **18**, 10-24.
103. Legris, P., and Viart, M. (1961). Bioclimates of South India and Ceylon, pp. 165-178,
104. 1 map., Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
105. Malgren, B., and Nordlund, U. (1997a). Application of artificial neural network to paleoceanographic data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **136**, 359-373.
106. Malgren, B., and Nordlund, U. (1997b). Application of artificial neural networks to chemostratigraphy. *Paleoceanography* **11**, 502-512.
107. McClure, H. A. (1976). Radiocarbon chronology of late Quaternary lakes in the Arabian Desert. *Nature* **263**, 755-756.
108. Moss, P. T., and Kershaw, A. P. (2000). The last glacial cycle from the humid tropics of northeastern Australia: comparison of a terrestrial and a marine record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **155**, 155-176.
109. Nair, N. C., and Daniels, P. (1986). The flora of the Western Ghats: A review. *Proc. Indian Acad. Sci. (Suppl.)*, 127-163.
110. Nayar, T. S. (1990). "Pollen flora of Maharashtra State, India." Today & Tomorrow's Printer and Publishers, Delhi.
111. Neilson, R. P. (1995). A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications* **5**, 362-386.
112. Neilson, R. P., King, G. A., DeVelice, J., Lenihan, G., Marks, D., Dolph, J., Campbell, B., and Glick, G. (1989). Sensitivity of ecological landscapes and regions to global climate change. US Environmental Protection Agency, Corvallis.
113. Orshan, G. (1989). Plant Pheno-Morphological Studies in Mediterranean Ecosystems. In "Geobotany.", Junk, The Hague.
114. Overpeck, J., Anderson, D., Trumbore, S., and Prell, W. (1996). The southwest Indian Monsoon over the last 18 000 years. *Climate Dynamics* **12**, 213-225.
115. Owen, R. B., Barthleme, J. W., Renaut, R. W., and Vincens, A. (1982). Palaeolimnology and archaeology of Holocene deposits northeast of lake Turkana, Kenya. *Nature* **298**, 523-529.
116. Pachur, H., and Hoelzmann, P. (1991). Paleoclimatic implications of late Quaternary lacustrine sediments in western Nubia, Sudan. *Quaternary Research* **36**, 257-276.
117. Pachur, H. J., and Kröpelin, S. (1987). Wadi Howar: palaeoclimatic evidence from an extinct river system in the southeastern Sahara. *Science* **237**, 298-300.
118. Pascal, J.-P. (1982). Bioclimates of the Western Ghats. Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech.

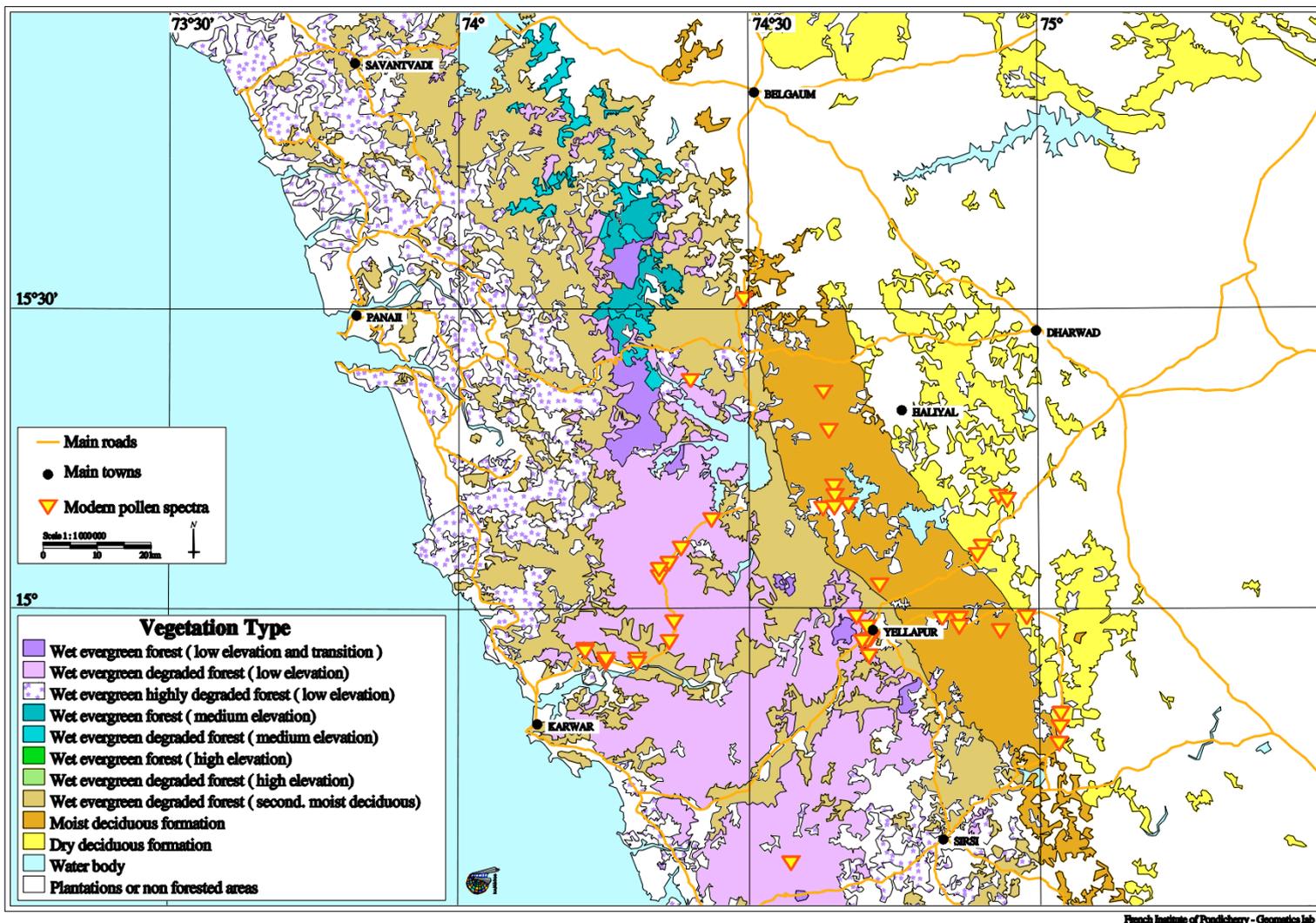
119. Pascal, J.-P. (1986). "Explanatory booklet on the forest map of South India." Karnataka Forest Department and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
120. Pascal, J.-P. (1988). "Wet evergreen forests of the Western Ghats of India." Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech.
121. Pascal, J. P., Shyam Sunder, V., and Meher-Homji, V. M. (1982a). Forest map of South India - Sheet: Shimoga. Karnataka and Kerala Forests Departments and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
122. Pascal, J.-P., and Ramesh, B. R. (1995). "Notes on the Sheet Bangalore-Salem." Karnataka and Tamil Nadu Forest Departments and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
123. Pascal, J.-P., Shyam Sunder, V., and Meher-Homji, V. M. (1982b). Forest map of South India - sheet: Mercara/Mysore. Karnataka and Kerala Forest Departments and the French Institute of Pondicherry. Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.
124. Pascal, J.-P., Shyam Sunder, V., and Meher-Homji, V. M. (1984). Forest map of South India - sheet: Belgaum-Dharwar-Panaji. Karnataka Forest Department and the French Institute of Pondicherry. *Inst. fr. Pondichéry, trav. Sci. tech.*
125. Peterson, G. M., Webb III, T., Kutzbach, J. E., van der Hammen, T., Wijmistra, T. A., and Street, F. A. (1979). The continental record of environmental conditions at 18,000 yr B.P.: an initial evaluation. *Quaternary Research* **12**, 47-82.
126. Peyron, O., Guiot, J., Cheddadi, R., Tarasov, P., Reille, M., de Beaulieu, J. L., Bottema, S., and Andrieu, V. (1998). Climatic reconstruction in Europe for 18,000 YR B.P. from Pollen Data. *Quaternary Research* **49**, 183-196.
127. Porter, S. C., An, Z., and Zheng, H. (1992). Cyclic Quaternary alluviation and terracing in a nonglaciaded drainage basin on the north flank of the Qiling Shan, central China. *Quaternary Research* **38**, 157-169.
128. Prell, W., and Kutzbach, J. E. (1992). Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution. *Nature* **360**, 647-652.
129. Prell, W. E., and Van Campo, E. (1986). Coherent response of Arabian Sea upwelling and pollen transport to late Quaternary monsoonal winds. *Nature* **323**, 526-528.
130. Prell, W. L. (1984). Monsoonal climate of the Arabian Sea during the Late Quaternary: A response to changing solar radiation. In "Milankovitch and Climate, Part 1." (A. Berger, J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla, and B. Saltzman, Eds.), pp. 349-366, Reidel.
131. Prell, W. L., and Kutzbach, J. E. (1987). Monsoon variability over the past 150000 years. *Journal of Geophysical Research* **82**, 8411-8425.
132. Prell, W. L., Marvil, R. E., and Luther, M. E. (1990). Variability in upwelling fields in the northwestern Indian Ocean 2. Data-model comparison at 9000 years B.P. *Paleoceanography* **5**, 447-457.
133. Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A., and Solomon, A. M. (1992). A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* **19**, 117-134.
134. Prentice, I. C., Sykes, M. T., and Cramer, W. (1993). A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecological Modelling* **65**, 51-70.
135. Raj, B., and Van der Werff, H. (1988). A contribution to the pollen morphology of Neotropical Lauraceae. *Annals of Missouri Botanical Garden* **75**, 130-167.

136. Ramachandran, G., and Banerjee, A. K. (1983). The sub-divisional rainfall distribution across the Western Ghats during the southwest monsoon season. *Mausam* **34**, 179-184.
137. Ramage, C. S. (1971). "Monsoon Meteorology." Academic Press, New York.
138. Ramesh, B. R., De Franceschi, D., and Pascal, J.-P. (1998). Forest map of South India - Sheet Thiruvananthapuram-Tirunelveli. Kerala and Tamil Nadu Forest Departments, Kerala Forest Research Institute, and French Institute Pondicherry. Inst. fr. Pondichery. trav. sec. sci. tech. Hors serie 18., Pondicherry.
139. Ramesh, B. R., and Pascal, J. P. (1997). "Atlas of endemics of the Western Ghats (India). Distribution of tree species in the evergreen and semi-evergreen forests." Institut Français de Pondichéry, Inde, Pondichéry.
140. Ramesh, B. R., Salvador, S., and Delattre E. (submitted). Assessment of deforestation and anthropogenic pressure in the Western Ghats, India: A case study of Kodagu District. .
141. Ramstein, G., Fluteau, F., Besse, J., and Joussaume, S. (1997). Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature* **386**, 788-795.
142. Rind, D., and Peteet, D. (1985). Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea-surface temperature estimates: Are they consistent? *Quaternary Research* **24**, 1-22.
143. Ritchie, J. C., and Haynes, C. V. (1987). Holocene vegetation zonation in the eastern Sahara. *Nature* **330**, 645-647.
144. Rodgers III, J. C., and Horn, S. P. (1996). Modern pollen spectra from Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **124**, 53-71.
145. Roeland, J.-C., Guiot, J., and Bonnefille, R. (1988). Pollen et reconstruction quantitative du climat. Validation des données d'Afrique orientale. *C. R. Acad. Sci. Paris* **307, série II**, 1735-1740.
146. Rowley, J. R., and Vasanthi, G. (1993). Exine development, structure and resistance in pollen of *Cinnamomum* (Lauraceae). *Grana (supplement)* **2**, 49-53.
147. Ruddiman, W. F., Prell, W. L., and Ratmo, M. E. (1989). Late Cenozoic uplift of southern Asia and the American West: Rationale for general circulation modeling experiments. *Journal of Geophysical Research* **94**, 18379-18391.
148. Rudiman, W. F., and Kutzbach, J. E. (1989). Forcing of the Late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American west. *Journal of Geophysical Research* **94(D15)** **18**, 409-427.
149. Sanders, H. L. (1968). Marine benthic diversity: a comparative study. *The American Naturalist* **102**, 243-282.
150. Seth, S. K., and Waheed Khan, M. A. (1959). Bioclimate and plant introduction in dry zone. *Indian Forester* **85**, 376-384.
151. Singh, G., Joshi, R. D., and Singh, A. B. (1972). Stratigraphic and radiocarbon evidence for the age and development of three salt lake deposits in Rajasthan, India. *Quaternary Research* **2**, 496-505.
152. Singh, G., Wasson, R. J., and Agrawal, D. P. (1990). Vegetational and seasonal climatic changes since the last full glacial in the Thar Desert, northwestern India. *Review of Palaeobotany and Palynology* **64**, 351-358.
153. Singh, N. (1986). On the duration of the rainy season over different parts of India. *Theoretical Applied Climatology* **37**, 51-62.

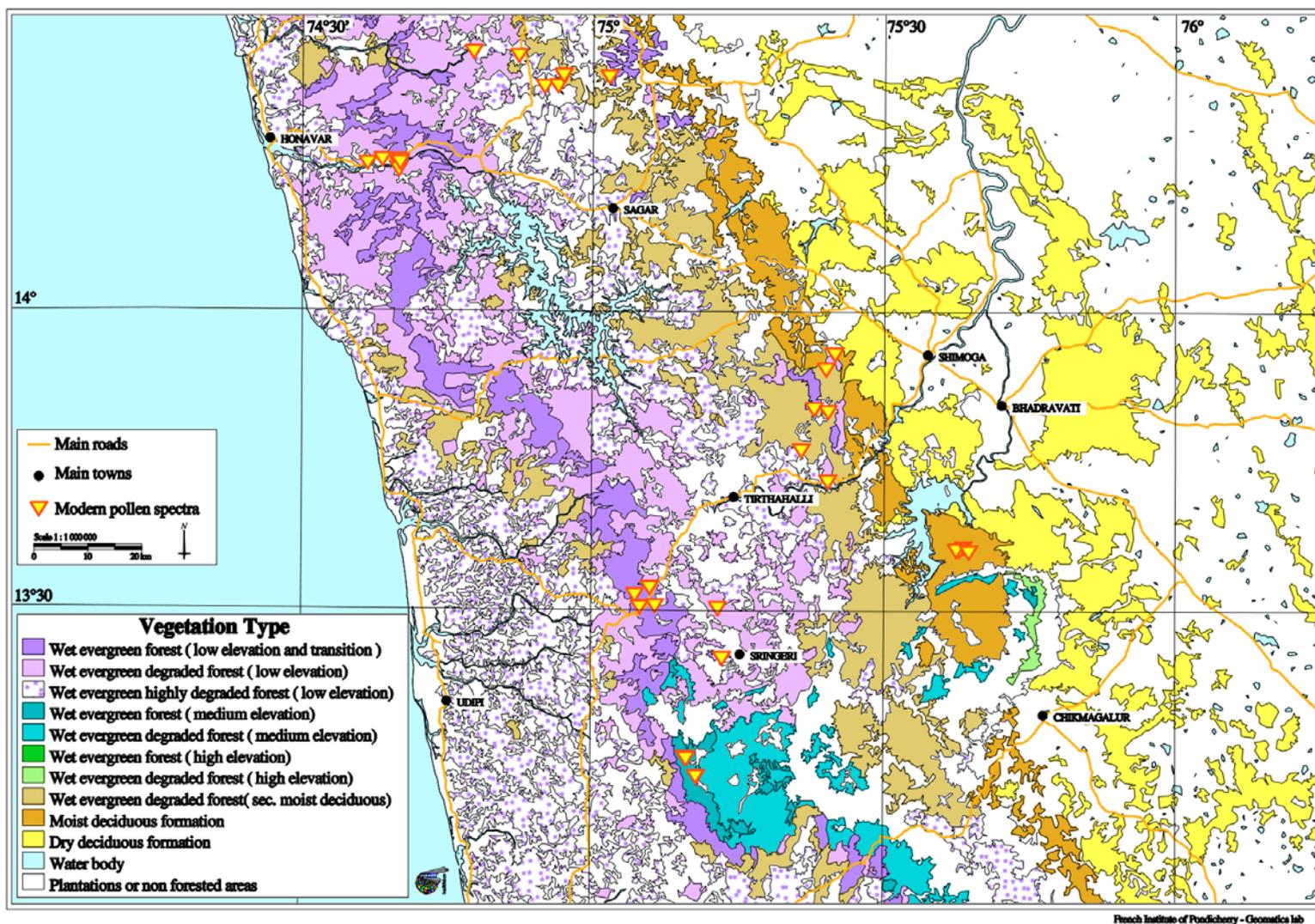
154. Sirocko, F., Sarnthein, M., and Erlenkeuser, H. (1991). Atmospheric summer circulation and coastal upwelling in the Arabian Sea during the Holocene and last glaciation. *Quaternary Research* **36**, 72-93.
155. Soepadmo, E. (1972). Fagaceae. Flora Malesiana, Serie I. Spermatophyta (flowering plants). *Sijthoff-Noordhoff, Alphen a/d Rijn* **7**, 265-403.
156. Street-Perrott, F. A., and Perrott, R. A. (1990). Abrupt climate fluctuations in the tropics: the influence of the Atlantic Ocean circulation. *Nature* **343**, 607-612.
157. Sukumar, R., Ramesh, R., Pant, R. K., and Rajagopalan, G. (1993). A delta 13C record of Late Quaternary climate change from tropical peats in Southern India. *Nature* **364**, 703-706.
158. Sundarapandian, S. M., and Swamt, P. S. (1997). Plant biodiversity at low-elevation evergreen and moist deciduous forests at Kodayar (W. Ghats, India). *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* **23**, 363-379.
159. Sutra, J. P. (1997). "Histoire de la végétation et du climat au cours de 30 derniers millénaires dans le massif des Nilgiri (Inde du sud): approche palynologique." Unpublished Thèse de Doctorat thesis, Aix-Marseille III.
160. Sutra, J. P., Bonnefille, R., and Fontugne, M. (1997). Etude palynologique d'un nouveau sondage dans les marais de Sandynallah (Massif des Nilgiri, sud-ouest de l'Inde). *Géographie physique et Quaternaire* **51**, 415-426.
161. Swain, A. M., Kutzbach, J. E., and Hastenrath, S. (1983). Estimates for Holocene precipitation for Rajasthan, India, based on pollen and lake level data. *Quaternary Research* **19**, 1-17.
162. Taylor, D. M. (1990). Late Quaternary pollen records from two Ugandan mires: evidence for environmental change in the Rukia Highlands of southwest Uganda. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **80**, 283-300.
163. Thainikainmoni, G. (1966). "Contribution à l'Etude Palynologique des Palmiers." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
164. Thainikainmoni, G. (1984). "Ménispermacées: Palynologie et Systématiques." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
165. Tissot, C., Chikhi, H., and Nayar, T. S. (1994). "Pollen of wet evergreen forests of the Western Ghats, India." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
166. Toussoun, O. (1925). Mémoires sur l'Histoire du Nil. Mem. Inst. Egypte.
167. Van Campo, E. (1983). "Paléoclimatologie des bordures de la mer d'Arabie depuis 150,000 ans : Analyse pollinique et Stratigraphie isotopique."
168. Van Campo, E. (1986). Monsoon fluctuations in two 20,000 yr B.P. Oxygen-isotope/pollen records off southwest India. *Quaternary Research* **26**, 376-388.
169. Van Campo, E., Duplessy, J. C., and Rossignol-Strick, M. (1982). Climatic conditions deduced from a 150 kyr oxygen isotope-pollen record from the Arabian Sea. *Nature* **296**, 56-59.
170. Van der Kaars, S., Wang, X., Kershaw, P. A., Guichard, F., and Arifin Setiabudi, D. (2000). A late Quaternary palaeoecological record from the Banda Sea, Indonesia: patterns of vegetation, climate and biomass burning in Indonesia and northern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **155**, 135-153.
171. Van der Kaars, W. A. (1991). Palynology of eastern Indonesian marine piston-cores: A Late Quaternary vegetational and climatic record for Australasia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **117**, 55-72.

172. Van der Kaars, W. A., and Dam, M. A. C. (1995). A 135,000-year record of vegetational and climatic change from the bandung area, West-Java, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **117**, 55-72.
173. Van der Merwe, J. J. M., Van Wyk, A. E., and Kok, P. D. F. (1990). Pollen types in the Lauraceae. *Grana* **29**, 185-196.
174. Vasanthi, G. (1976). "Pollens des montagnes du Sud de l'Inde (Pollen of South Indian hills)." Inst. fr. Pondichéry, trav. Sec. Sci. Tech., Pondicherry.
175. Vasanthi, G. (1988). Pollen analysis of Late Quaternary sediments: evolution of upland savanna in Sandynallah (Nilgiris, South India). *Review of Palaeobotany and Palynology* **55**, 175-192.
176. Vincens, A., Dubois, M. A., Guillet, B., Achoudong, G., Buchet, G., Kamgang Kabeyene Beyala, V., de Namur, C., and Riera, B. (2000). Pollen-rain - vegetation relationships along a forest-savanna transect in southeastern Cameroon. *Review of Palaeobotany and Palynology* **110**, 191-208.
177. Vincens, A., Ssemmanda, I., Roux, M., and Jolly, D. (1997). Study of the modern pollen rain in Western Uganda with a numerical approach. *Revue of Paleobotany and Palynology* **96**, 145-168.
178. Walker, G. T. (1910). *Indian Meteor. Memoir* **21**, 1-21.
179. Watson, L., and Dallwitz, M. J. (1992). The Families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification and information retrieval. <http://biodiversity.uno.edu/delta/>.
180. Webster, P. J. (1978). Late Quaternary ice age climates of tropical Australasia: interpretations and reconstructions. *Quaternary Research* **10**, 279-309.
181. Webster, P. J. (1987). The elementary monsoon. In "Monsoons." (J. S. Fein, and P. L. Stephens, Eds.), pp. 3-32. John Wiley & Sons, Washington, DC.
182. Webster, P. J., Magaña, V. O., Palmer, T. N., Shukla, J., Tomas, R. A., Yanai, M., and Yasunari, T. (1998). Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research* **103**, 14451-14510.
183. Whitmore, T. C. (1975). "Tropical rain forests of the Far East." Oxford Univ. Press, Oxford.
184. Whittaker, R. H. (1975). "Communities and Ecosystems." Macmillan, New York.
185. Woodward, F. I. (1987). "Climate and Plant Distribution." Cambridge University Press, Cambridge.
186. Zabler, L. (1986). A world soil file for global climate modelling, pp. 32. NASA Technical Memorandum.

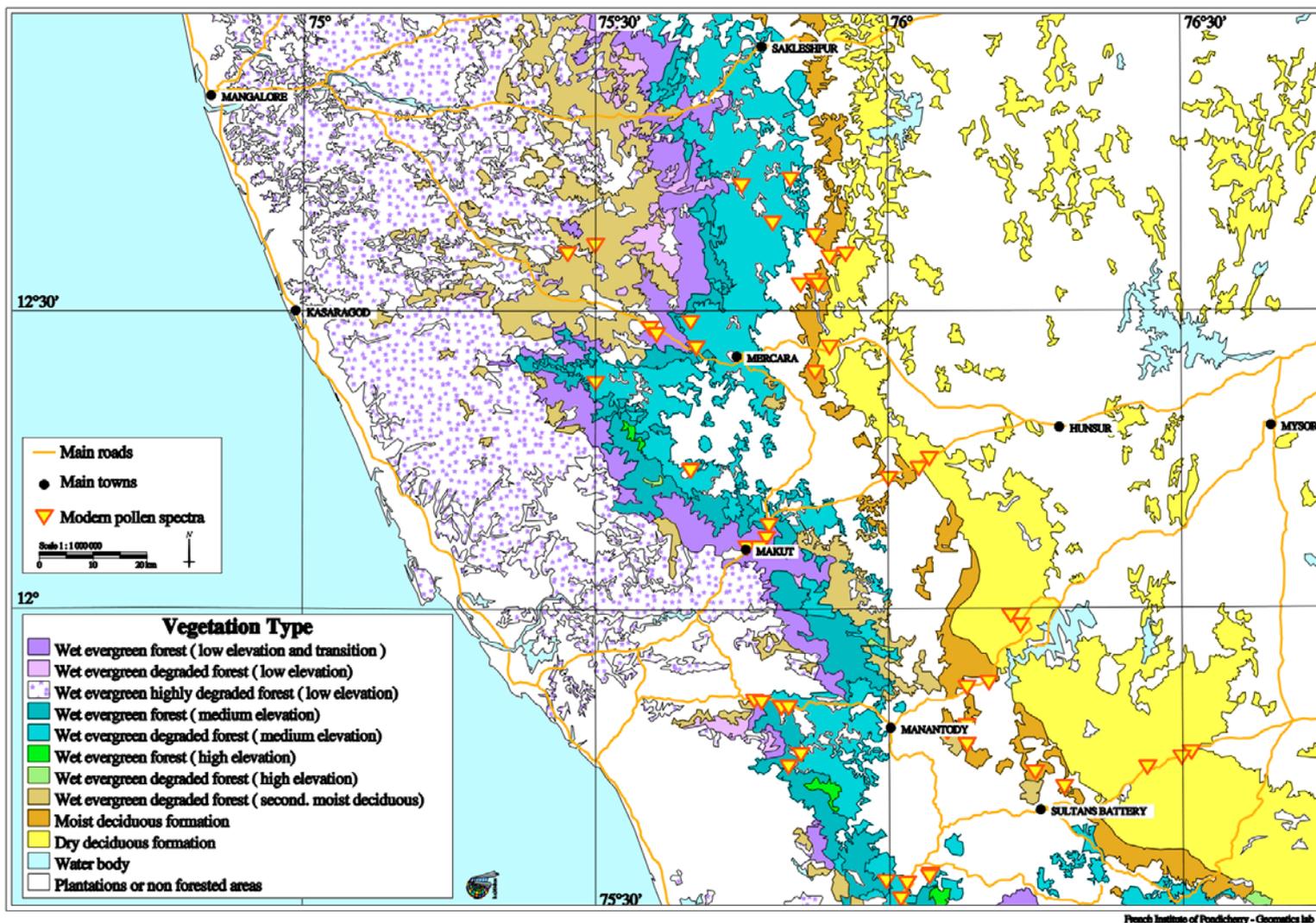
ANNEXES



Carte simplifiée de la végétation de la région de Belgaum -Dharwar -Panaji entre 16° et 14°30'N, d'après Pascal et al. (1984).

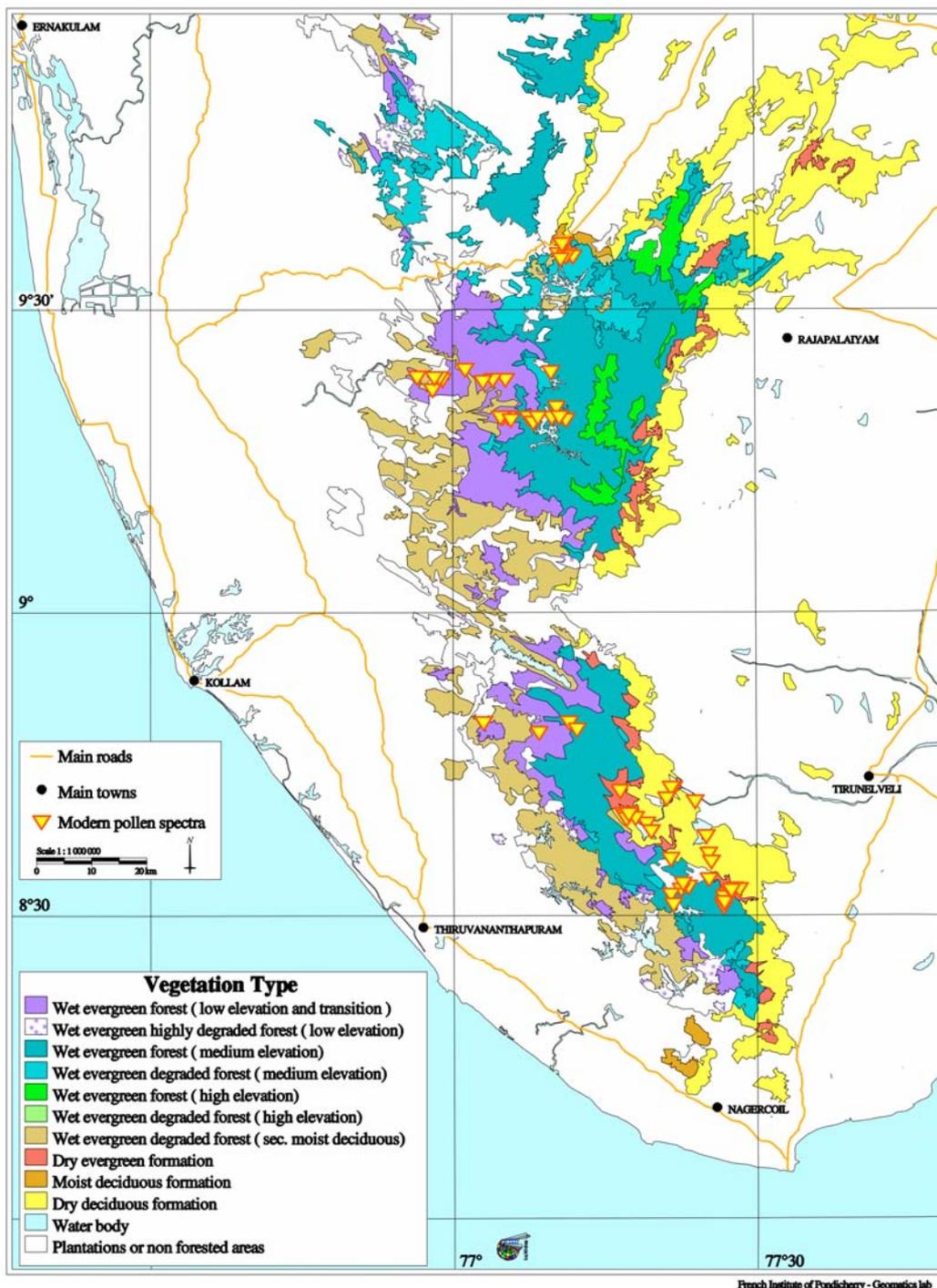


Carte simplifiée de la végétation de la région de Shimoga entre 14°30'N et 13°N, d'après Pascal et al. (1982a).



Carte simplifiée de la végétation de la région de Mercara -Mysore entre 13°N et 11°30'N, d'après Pascal et al. (1982b).

ANNEXE I.4



Carte simplifiée de la végétation de la région de Thiruvananthapuram -Tirunelveli entre 10° et 8°N, d'après Ramesh et al. (1998).

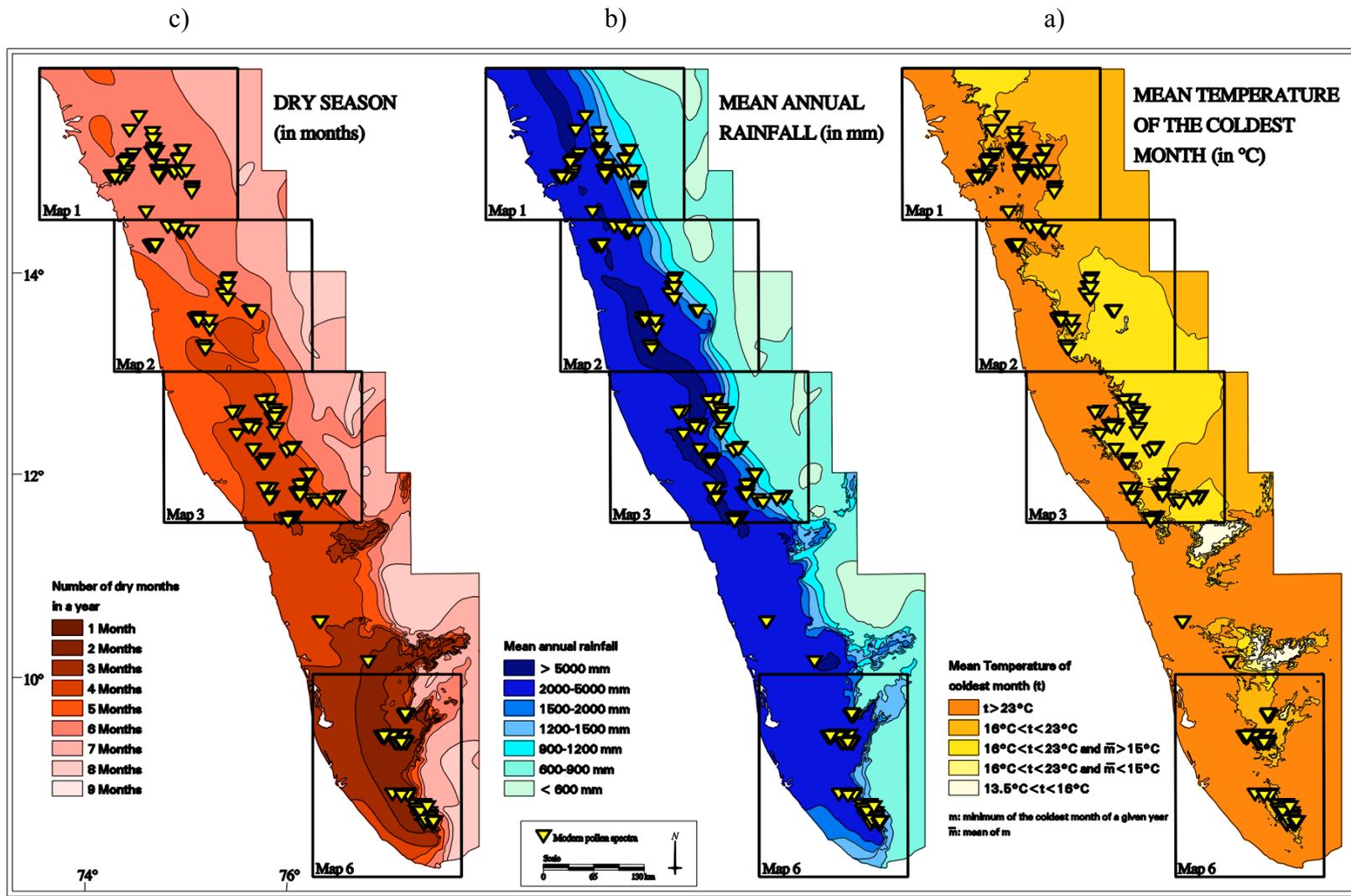


Figure I.5: Bioclimats des Ghâts occidentaux, Inde du sud (Pascal, 1982)

N° de l'éch.	Localité	Altitude (m)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Type de formation (et degré de dégradation +)	Physionomie	Type floristique	Σ Pollen	Σ Taxa	Σ Taxa IC
WG1	Sunkaddakate	770	76° 12' 29"	11° 59' 17"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	431	28	7
WG2	Kalbavi	720	76° 13' 30"	11° 58' 16"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	297	21	4
WG3	Hosur	740	76° 10' 16"	11° 52' 30"	Décidu humide	Forêt	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	486	21	3
WG4	Kadeggade	720	76° 07' 59"	11° 52' 01"	Plantation de Teck	Plantation				stérile
WG5	Panayambam	940	76° 15' 00"	11° 43' 30"	Décidu humide	Forêt	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	508	28	5
WG6	Kuruchipotta	760	76° 07' 59"	11° 48' 11"	Décidu humide	Forêt	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	477	32	5
WG7	Pakkam	720	76° 06' 00"	11° 47' 31"	Secondaire- décidu humide	Forêt	non déterminé	490	28	5
WG8	Vellambam	760	76° 07' 59"	11° 46' 15"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	493	32	5
WG9	Anapara (a)	820	76° 04' 15"	11° 33' 14"	Sempervirent de moy. altitude	++ Savanne arborée	non déterminé	488	35	6
WG10	Anapara (b)	840	76° 04' 08"	11° 33' 00"	Sempervirent de moy. altitude	++ Savanne arborée	non déterminé	274	19	4
WG11	Lakkidi	800	76° 00' 43"	11° 30' 50"	Sempervirent de moy. altitude	+ Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	639	37	5
WG12	Pukkot	720	76° 01' 51"	11° 32' 20"	Sempervirent de moy. altitude	++ Arbustes dispersés	non déterminé	468	26	5
WG13	Tariyode (disp.)	730	75° 59' 45"	11° 32' 31"	Sempervirent de moy. altitude	+ Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	480	40	6
WG14	Manappadu	820	75° 49' 41"	11° 44' 02"	Sempervirent de moy. altitude	+ Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	307	30	7
WG15	Kanda Kunnu	740	75° 51' 00"	11° 45' 14"	Sempervirent de moy. altitude	++ Arbustes dispersés	non déterminé	491	37	5
WG18	Anjilha	480	75° 46' 59"	11° 50' 13"	Sempervirent de basse altitude	Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	510	32	4
WG19	Anjilha	320	75° 46' 26"	11° 50' 17"	Sempervirent de basse altitude	Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	471	40	6
WG20	West Makut	220	75° 45' 29"	12° 6' 00"	Sempervirent de basse altitude	Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	481	35	5
WG21	Memonkolli	400	75° 46' 44"	12° 6' 00"	Sempervirent de basse altitude	Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	488	36	4
WG22	Jamedar Kallu	600	75° 47' 31"	12° 7' 01"	Sempervirent de basse altitude	Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	505	37	2
WG23	Perambadi	860	75° 47' 45"	12° 8' 13"	Sempervirent de moy. altitude	+ Forêt	<i>Mesua - Palaquium</i>	496	41	4
WG26	Mannageri	730	75° 40' 19"	12° 26' 09"	Sempervirent de moy. altitude	++ Forêt	non déterminé	495	44	5
WG27	Glencoorg	300	75° 37' 01"	12° 27' 11"	Sempervirent de basse altitude	+ Forêt dense	<i>Dipterocarpus i.- Kingiodendron- Humboldtia</i>	492	30	5
WG28	Koyanad	130	75° 35' 38"	12° 28' 08"	Plantation	Plantation (bois d'œuvre)	non déterminé	479	29	7
WG29	Dodtotta	110	75° 27' 11"	12° 35' 38"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	435	31	6
WG30	Mavankatte	170	75° 30' 00"	12° 36' 29"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	499	20	4
WG31	Kiribetta	900	75° 51' 03"	12° 32' 20"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	323	31	2
WG32	Santhalli	1200	75° 48' 11"	12° 38' 45"	Sempervirent de moy. altitude	++ Forêt	non déterminé	504	32	3
WG33	Godlahalli	920	75° 45' 00"	12° 42' 29"	Non forestier	Prairie	non déterminé			stérile
WG34	Basgulla	960	75° 49' 59"	12° 43' 08"	Non forestier	Prairie	non déterminé			stérile
WG35	Honkadu	1060	75° 52' 30"	12° 37' 30"	Décidu humide	Savanne arborée/arbustive	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile
WG36	Doddabbur	940	75° 54' 03"	12° 35' 20"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	479	25	3
WG37	Gonimaru	960	75° 55' 37"	12° 35' 38"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	490	26	6
WG38	Belur	1010	75° 52' 41"	12° 32' 42"	Décidu humide	Savanne arborée/arbustive	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	445	34	6
WG39	Arasikere Betta	990	75° 52' 51"	12° 32' 31"	Décidu humide	Savanne arborée/arbustive	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile
WG40	Guddehosur	860	75° 54' 00"	12° 26' 17"	Décidu sec	Savanne arborée/arbustive	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	495	26	4
WG41	Magador	850	75° 52' 30"	12° 23' 45"	Décidu humide	Forêt dense	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	502	22	3
WG42	Titimati	860	76° 00' 11"	12° 13' 01"	Décidu humide	Forêt dense	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	495	21	4

N° de	Localité	Altitude	Longitude	Latitude	Type de formation	Physionomie	Type floristique	Σ	Σ	Σ
-------	----------	----------	-----------	----------	-------------------	-------------	------------------	---	---	---

l'éch.	(m)	(°E)	(°N)	(et degré de dégradation +)		Pollen	Taxa	Taxa IC
WG43	Mattigadu	860	76° 03' 07"	12° 14' 06"	Décidu sec	Savanne arborée/arbustive	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	448 21 7
WG44	Anechaur	920	76° 04' 08"	12° 15' 00"	Décidu sec	Savanne arborée et bambou	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	223 22 3
WG46	Patticard RF	150	76° 20' 00"	10° 31' 00"	Secondaire- décidu humide	++ Savanne arborée	non déterminé	235 29 4
WG47	Patticard RF	300	76° 20' 00"	10° 31' 00"	Secondaire- décidu humide	++ Savanne arborée	non déterminé	493 36 4
WG48	Patticard RF	500	76° 20' 00"	10° 31' 00"	Sempervirent humide de basse altitude	+ Forêt dense	non déterminé	295 33 4
WG49	Malayatur RF	240	76° 48' 45"	10° 7' 30"	Sempervirent humide de basse altitude	++ Savanne arborée et bambou	non déterminé	293 23 5
WG50	Pongu Malai	1100	77° 12' 14"	8° 48' 21"	Sempervirent humide de moy. altitude	+ Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta</i>	572 39 2
WG51	Pongu Malai	750	77° 11' 31"	8° 49' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	+ Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta</i>	164 30 2
WG52	Pongu Malai	180	77° 08' 31"	8° 48' 00"	Non forestier	Prairie (bordure de forêt)	<i>Hopea r. - Humboldtia d. faciès du type Dipterocarpus i. - Kingiodendron- Strombosia</i>	503 33 5
WG53	Yeru RF	130	77° 03' 00"	8° 49' 01"	Sempervirent humide de basse altitude	+ Forêt	<i>Hopea r. - Humboldtia d. faciès du type Dipterocarpus i. - Kingiodendron- Strombosia</i>	576 31 4
WG54	Alatur RF	840	76° 18' 07"	11° 41' 49"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	271 25 4
WG55	Ponkulli	800	76° 26' 31"	11° 43' 59"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	297 24 6
WG56	Heb Halla	860	76° 30' 00"	11° 45' 00"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	273 20 2
WG57	Maddur	900	76° 31' 01"	11° 45' 29"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	298 26 3
WG58	Papanasam	140	77° 21' 47"	8° 42' 32"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	414 38 5
WG59	Papanasam	200	77° 21' 32"	8° 42' 32"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	stérile
WG60	Hope lake	340	77° 17' 20"	8° 39' 57"	Décidu sec	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	288 34 4
WG61	Hope lake	300	77° 16' 59"	8° 40' 01"	Décidu sec*	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	360 26 2
WG62	Hope lake	270	77° 16' 59"	8° 40' 01"	Décidu sec*	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	201 34 4
WG63	Hope lake	263	77° 16' 48"	8° 40' 01"	Décidu sec*	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	579 47 6
WG64	Hope lake	260	77° 16' 48"	8° 40' 01"	Décidu sec*	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	300 45 5
WG65	Hope lake	260	77° 16' 59"	8° 39' 47"	Décidu sec*	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	302 32 3
WG66	Hope lake	300	77° 17' 06"	8° 39' 29"	Décidu sec	Forêt dense	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	307 25 3
WG67	Hope lake	320	77° 18' 00"	8° 39' 32"	Sempervirent sec	+ Forêt	<i>Diospyros - Mitreophora - Miliusa</i>	stérile
WG68	Hope lake	260	77° 19' 08"	8° 39' 00"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	stérile
WG69	Hope lake	280	77° 19' 33"	8° 38' 17"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	stérile
WG70	Kadamadi	310	77° 16' 30"	8° 42' 14"	Sempervirent sec	+ Forêt	<i>Hopea u. faciès du type Diospyros-Mitreophora-Miliusa- Kingiodendron</i>	482 31 6
WG71	Mundanturai	210	77° 21' 07"	8° 41' 31"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	292 32 2
WG72	Wembayapuram	60	77° 23' 56"	8° 41' 13"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	297 9 1
WG73	Manimuttar	130	77° 25' 01"	8° 37' 44"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	stérile
WG74	Kuvattati Mottai	420	77° 25' 15"	8° 36' 00"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Albizia - Acacia et Gyrocarpus</i> sur les versants	517 32 7
WG75	Kuvattati Mottai	580	77° 25' 30"	8° 35' 13"	Décidu sec	Savanne arbustive	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	stérile
WG76	Manjolai Mottai	920	77° 25' 15"	8° 33' 29"	Sempervirent humide de moy. altitude	+ Forêt dense	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta</i>	259 27 3
WG77	Manjolai	1100	77° 22' 41"	8° 33' 07"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	182 29 3
WG79	Nalmukku	1230	77° 22' 30"	8° 32' 31"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	stérile

N° de	Localité	Altitude	Longitude	Latitude	Type de formation	Physionomie	Type floristique	Σ	Σ	Σ
-------	----------	----------	-----------	----------	-------------------	-------------	------------------	---	---	---

l'éch.	(m)	(°E)	(°N)	(et degré de dégradation +)		Pollen	Taxa	Taxa IC
WG80	Mukkutukai	1220	77° 21' 29"	8° 31' 59"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	200 32 5
WG81	Kodayar dam	1270	77° 21' 47"	8° 31' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	288 36 5
WG82	Kudravatti	1120	77° 21' 29"	8° 35' 31"	Sempervirent humide de moy. altitude ++	Savanne arbustive	non déterminé	495 32 4
WG83	Sengalteri	1300	77° 26' 45"	8° 30' 43"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	516 31 2
WG84	Sengalteri	1250	77° 26' 45"	8° 31' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	378 30 3
WG85	Sengalteri	1200	77° 26' 45"	8° 31' 08"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	stérile
WG86	Sengalteri	1150	77° 26' 49"	8° 31' 12"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	212 31 2
WG87	Sengalteri	1050	77° 26' 45"	8° 31' 44"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	515 26 5
WG88	Sengalteri	1010	77° 27' 00"	8° 31' 48"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt dense	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta</i>	511 28 2
WG89	Sengalteri	980	77° 27' 07"	8° 31' 59"	Sempervirent humide de moy. altitude ++	Fourré et savanne arborée	non déterminé	509 28 2
WG90	Sengalteri	940	77° 27' 14"	8° 31' 59"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium - Gluta</i>	489 31 3
WG91	Sengalteri	900	77° 27' 21"	8° 32' 20"	Décidu sec	Savanne arborée/arbustive	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	502 25 3
WG92	Sengalteri	880	77° 27' 29"	8° 32' 24"	Décidu sec	Forêt	<i>Diospyros - Mitreophora - Milusa</i>	299 35 4
WG93	Sengalteri	720	77° 27' 47"	8° 32' 31"	Décidu sec	Savanne arborée	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	203 14 2
WG95	Vadasserikara	470	76° 58' 12"	9° 23' 09"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	612 38 2
WG96	Vadasserikara	400	76° 58' 1"	9° 22' 01"	Sempervirent humide de basse altitude +	Savanne arborée	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	415 25 4
WG97	Pamba	310	77° 05' 17"	9° 22' 59"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	439 36 5
WG98	Pamba	290	77° 04' 01"	9° 22' 59"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	138 19 2
WG99	Pamba	270	77° 04' 01"	9° 22' 59"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	304 29 3
WG100	Pamba	250	77° 03' 00"	9° 22' 48"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	391 18 0
WG101	Pamba	330	77° 01' 15"	9° 24' 00"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	502 26 3
WG102	Kochandi	170	76° 58' 59"	9° 22' 59"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	515 29 6
WG103	Kakkad	160	76° 58' 44"	9° 23' 09"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	stérile
WG104	Kakki reservoir	990	77° 09' 50"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	495 39 4
WG105	Kakki reservoir	980	77° 10' 37"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	540 36 3
WG106	Kakki reservoir	990	77° 11' 17"	9° 19' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	Forêt dense	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	198 34 1
WG107	Kakki reservoir	960	77° 11' 17"	9° 19' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	Prairie (bordure de forêt)	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	517 36 3
WG108	Kakki reservoir	1020	77° 10' 19"	9° 20' 13"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	198 29 4
WG109	Kakki reservoir	1000	77° 08' 27"	9° 19' 15"	Non forestier	Prairie	non déterminé	328 23 3
WG110	Kakki reservoir	1060	77° 07' 59"	9° 18' 47"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	stérile
WG111	Kakki reservoir	1110	77° 07' 30"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de moy. altitude +	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	502 33 3
WG112	Kakki reservoir	960	77° 05' 45"	9° 19' 01"	Sempervirent humide de moy. altitude	Bamboussaie à <i>Ochlandra</i>	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	492 22 4
WG113	Kakki reservoir	880	77° 05' 31"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	497 26 3
WG114	Kakki reservoir	880	77° 05' 31"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	502 32 4
WG115	Kakki reservoir	680	77° 04' 59"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	383 34 4
WG116	Kakki reservoir	600	77° 04' 44"	9° 19' 15"	Sempervirent humide de basse altitude +	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Dipterocarpus b. - Strombosia</i>	448 32 5
WG117	Pamba dam	920	77° 09' 43"	9° 23' 45"	Sempervirent humide de moy. altitude	Test sous <i>Podocarpus</i>	non déterminé	stérile
WG118	Tekkadi	880	77° 10' 33"	9° 35' 31"	Transition entre sec et humide	Savanne arborée	non déterminé	stérile

N° de	Localité	Altitude	Longitude	Latitude	Type de formation	Physionomie	Type floristique	Σ	Σ	Σ
-------	----------	----------	-----------	----------	-------------------	-------------	------------------	---	---	---

l'éch.	(m)	(°E)	(°N)	(et degré de dégradation +)			Pollen	Taxa	Taxa IC		
WG119	Tekkadi	880	77° 10' 48"	9° 34' 59"	Transition entre sec et humide	Savanne arborée	non déterminé	379	19	3	
WG120	Tekkadi	900	77° 10' 55"	9° 36' 29"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile	
WG121	Tekkadi	880	77° 11' 02"	9° 36' 18"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	500	30	2	
WG122	Tekkadi	880	77° 11' 31"	9° 35' 31"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	231	26	4	
WG123	Tekkadi	890	77° 11' 17"	9° 35' 13"	Sempervirent humide de moy. altitude	++	Fourré discontinu	non déterminé	370	37	4
WG125	Goteghali	141	74° 18' 25"	14° 54' 32"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	491	28	4	
WG126	Goteghali	100	74° 18' 25"	14° 54' 54"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	490	23	4	
WG127	Gopishitta	200	74° 13' 01"	14° 55' 51"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	503	22	3
WG128	Gopishitta	150	74° 13' 01"	14° 55' 41"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	499	26	3
WG129	Hapkarani	148	74° 15' 11"	14° 54' 57"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	502	29	1
WG130	Hapkarani	90	74° 15' 11"	14° 54' 36"	Semi-sempervirent		Forêt	non déterminé	497	22	3
WG131	Yana	350	74° 34' 15"	14° 34' 33"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	501	24	2
WG132	Near Kulgi	500	74° 38' 49"	15° 12' 11"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile	
WG133	Near Kulgi	510	74° 38' 56"	15° 11' 17"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	482	23	3	
WG134	Kalbavi	453	74° 40' 26"	15° 10' 19"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	449	27	4	
WG135	Kalbavi	453	74° 40' 19"	15° 10' 19"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	445	25	2	
WG136	Kulgi	507	74° 37' 41"	15° 10' 01"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	470	22	4	
WG137	Kulgi	496	74° 38' 53"	15° 10' 05"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile	
WG138	Chandvadi	580	74° 24' 00"	15° 22' 51"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	500	23	1
WG139	Digalamba	550	74° 26' 09"	15° 8' 49"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	500	30	3
WG140	Yellapur	550	74° 42' 14"	14° 58' 08"	Semi-sempervirent	++	Savanne arborée	non déterminé	499	25	2
WG141	Sabageri	560	74° 42' 36"	14° 56' 56"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	499	24	3	
WG142	Sabageri	560	74° 42' 14"	14° 56' 45"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	499	26	2	
WG143	Yellapur	570	74° 41' 42"	14° 56' 42"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	498	24	4
WG144	Mankod	575	74° 54' 57"	14° 22' 23"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	487	24	3	
WG145	Kangodu	587	74° 56' 20"	14° 22' 26"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	489	26	5	
WG146	Tandige	573	75° 01' 41"	14° 23' 20"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	497	27	4	
WG147	Jayanthigram	560	74° 56' 56"	14° 23' 27"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	498	21	3	
WG148	Sampegodu	628	74° 52' 19"	14° 25' 26"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	490	28	5	
WG149	Harsikatte	500	74° 47' 38"	14° 25' 51"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	486	22	4
WG150	Bisgod Road	545	74° 41' 06"	14° 59' 09"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	436	22	3
WG151	Magod falls Road	564	74° 42' 25"	14° 55' 15"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	500	23	2
WG152	Gerusoppa	110	74° 40' 04"	14° 14' 56"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	499	29	3
WG153	Gerusoppa	135	74° 36' 47"	14° 14' 38"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	491	26	2
WG154	Gerusoppa	90	74° 38' 17"	14° 15' 00"	Semi-sempervirent	+	Savanne arborée	non déterminé	493	28	5
WG155	Gerusoppa	290	74° 39' 43"	14° 15' 00"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	497	22	3
WG156	Gerusoppa	140	74° 40' 08"	14° 14' 42"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	501	32	2
WG157	Gerusoppa	310	74° 40' 01"	14° 13' 59"	Semi-sempervirent	+	Forêt	non déterminé	497	36	2

N° de	Localité	Altitude	Longitude	Latitude	Type de formation	Physionomie	Type floristique	Σ	Σ	Σ
-------	----------	----------	-----------	----------	-------------------	-------------	------------------	---	---	---

l'éch.	(m)	(°E)	(°N)	(et degré de dégradation +)			Pollen	Taxa	Taxa IC	
WG124A Tekkadi	900	77° 12' 00"	9° 35' 17"	Secondaire- décidu humide		Savanne arborée	non déterminé	460	34	2
WG124B Tekkadi	900	77° 12' 00"	9° 35' 17"	Secondaire- décidu humide		Savanne arborée	non déterminé			stérile
WG124C Tekkadi	900	77° 12' 00"	9° 35' 17"	Secondaire- décidu humide		Savanne arborée	non déterminé			stérile
WG16B Est Periyar (arbre)	740	75° 49' 44"	11° 49' 59"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	493	37	3
WG16A Est Periyar (sol)	740	75° 49' 44"	11° 49' 59"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	294	29	4
WG17A Periya (arbre)	760	75° 49' 01"	11° 49' 59"	Sempervirent de moy. altitude	+	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	486	37	5
WG17B Periya (sol)	760	75° 49' 01"	11° 49' 59"	Sempervirent de moy. altitude	+	Forêt	<i>Cullenia - Mesua - Palaquium</i>	486	37	5
WG24A Kuliyangad	1000	75° 39' 43"	12° 13' 44"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	503	36	2
WG24B Kuliyangad	980	75° 39' 43"	12° 13' 48"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	502	39	3
WG25A Tala Cauvery	1060	75° 30' 00"	12° 22' 41"	Sempervirent de moy. altitude	+	Forêt	<i>Mesua - Palaquium</i>	500	32	4
WG25B Onchalla	1000	75° 39' 43"	12° 28' 44"	Sempervirent de moy. altitude	++	Fourré dense	non déterminé	499	39	3
WG78A Kakkachi RH	1200	77° 23' 13"	8° 32' 45"	Sempervirent humide de moy. altitude		Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	220	30	4
WG78B Kakkachi RH	1200	77° 23' 13"	8° 32' 45"	Sempervirent humide de moy. altitude		Forêt dense	<i>Nageia</i> faciès du type <i>Cullenia-Mesua-Palaquium-Gluta</i>	383	38	4
WG94 Rajan Para	470	76° 56' 31"	9° 23' 13"	Secondaire- décidu humide		Savanne arborée	non déterminé	246	23	7
WG94T Sengalteri	620	77° 28' 15"	8° 32' 31"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Pterocarpus - Terminalia</i>	500	21	4
WG158 Near Nagathita	1040	75° 09' 36"	13° 15' 07"	Sempervirent de moy. altitude		Forêt dense	<i>Palaquium - Poeciloneuron - Hopea p.</i>	299	22	2
WG159 Ganamoda	1060	75° 09' 43"	13° 15' 00"	Sempervirent de moy. altitude		Forêt dense	<i>Palaquium - Poeciloneuron - Hopea p.</i>	298	20	5
WG160 Bhagawati Valley	940	75° 10' 44"	13° 13' 15"	Sempervirent de moy. altitude	++	Forêt	non déterminé	301	20	3
WG161 Ganapathi temple	920	75° 10' 48"	13° 13' 12"	Sempervirent de moy. altitude	++	Savanne arborée	non déterminé	319	21	3
WG162 Jogigund	660	75° 06' 29"	13° 30' 21"	Semi-sempervirent	++	Savanne arborée	<i>Dipterocarpus i. - Humboldtia - Poeciloneuron</i>	491	46	6
WG163 Agumbe	640	75° 04' 26"	13° 31' 26"	Semi-sempervirent	+	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Humboldtia - Poeciloneuron</i>			stérile
WG164 Agumbe	650	75° 05' 56"	13° 32' 09"	Semi-sempervirent	+	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Humboldtia - Poeciloneuron</i>			stérile
WG165 Sringeri	710	75° 13' 26"	13° 25' 05"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	511	34	5
WG166 Abbe forest road	683	75° 04' 55"	13° 30' 14"	Semi-sempervirent	+	Forêt	<i>Dipterocarpus i. - Humboldtia - Poeciloneuron</i>	42	17	0
WG167 Karmara	661	75° 12' 57"	13° 30' 07"	Secondaire- décidu humide		Forêt	non déterminé	400	45	4
WG168 Pala	610	75° 02' 02"	14° 46' 30"	Décidu humide		Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	300	25	3
WG169 Pala	600	75° 02' 09"	14° 48' 11"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	295	23	3
WG170 Entre Pala & Katur	572	75° 02' 13"	14° 49' 30"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	379	19	3
WG171 Kusur	535	74° 58' 44"	14° 59' 09"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	406	20	4
WG172 Gunjavatti	525	74° 55' 59"	14° 57' 43"	Décidu humide		Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	200	18	2
WG173 Siddlagundi	589	74° 51' 47"	14° 58' 08"	Décidu humide		Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	199	21	2
WG174 Mulgod	484	74° 51' 47"	14° 58' 59"	Décidu humide		Forêt dense	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	386	24	3
WG175 Hunshettykoppa	510	74° 49' 59"	14° 58' 59"	Décidu humide		Forêt dense	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	351	21	2
WG176 Dombargdli	500	74° 43' 30"	15° 2' 20"	Décidu humide		Forêt dense	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	347	28	4
WG177 Sangtikoppa	537	74° 53' 38"	15° 5' 20"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>			stérile
WG178 Kalghatgi road	543	74° 54' 11"	15° 6' 11"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	211	20	2
WG179 Kalghatgi	554	74° 56' 45"	15° 10' 51"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	300	29	1
WG180 Kalkundi	557	74° 55' 51"	15° 11' 09"	Décidu sec		Savanne arborée	<i>Anogeissus - Tectona - Terminalia</i>	374	24	3

N° de	Localité	Altitude	Longitude	Latitude	Type de formation	Physionomie	Type floristique	Σ	Σ	Σ
-------	----------	----------	-----------	----------	-------------------	-------------	------------------	---	---	---

l'éch.	(m)	(°E)	(°N)	(et degré de dégradation +)			Pollen	Taxa	Taxa IC	
WG181	Barchi	495	74° 38' 20"	15° 17' 45"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	364	25	3
WG182	Nanakesarolli	538	74° 37' 44"	15° 21' 39"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>			stérile
WG183	Kamatga	708	74° 29' 35"	15° 30' 57"	Secondaire- décidu humide	Dense	non déterminé	408	32	3
WG184	Anshi	514	74° 22' 59"	15° 6' 00"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	497	28	4
WG185	Anshi	546	74° 21' 47"	15° 4' 30"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	499	28	2
WG186	Anshi	560	74° 20' 42"	15° 3' 54"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	543	33	1
WG187	Anshi	580	74° 20' 45"	15° 3' 11"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	512	31	1
WG188	Anshi	530	74° 22' 15"	14° 58' 41"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	500	31	1
WG189	Anshi	390	74° 21' 47"	14° 56' 38"	Semi-sempervirent	+ Forêt	non déterminé	506	41	4
WG190	Kudi state forest	780	75° 24' 57"	13° 55' 37"	Semi-sempervirent	Savanne arborée	non déterminé	324	26	1
WG191	Kalkoppa	770	75° 24' 03"	13° 54' 07"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	248	24	5
WG192	Hanigeri	700	75° 24' 14"	13° 49' 51"	Secondaire- décidu humide	Forêt dense	non déterminé	200	22	4
WG193	Basavanagadde	770	75° 22' 51"	13° 50' 09"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	441	36	6
WG194	Yedavatti	640	75° 21' 29"	13° 46' 01"	Secondaire- décidu humide	Savanne arborée	non déterminé	500	36	5
WG195	Begavalli	630	75° 24' 14"	13° 42' 50"	Secondaire- décidu humide	Forêt	non déterminé	711	32	2
WG196	Bhadra	780	75° 38' 13"	13° 36' 14"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	263	26	3
WG197	Bhadra	676	75° 37' 30"	13° 36' 00"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	297	24	2
WG198	Bhadra	690	75° 38' 45"	13° 35' 49"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	153	15	2
WG199	Bhadra	715	75° 37' 51"	13° 36' 00"	Décidu humide	Savanne arborée	<i>Lagestroemia - Tectona - Dillenia</i>	342	19	3

Σ Pollen : Somme pollinique sur laquelle sont basés les pourcentages des taxons

Σ Taxa : Nombre de taxons représentés dans le spectre

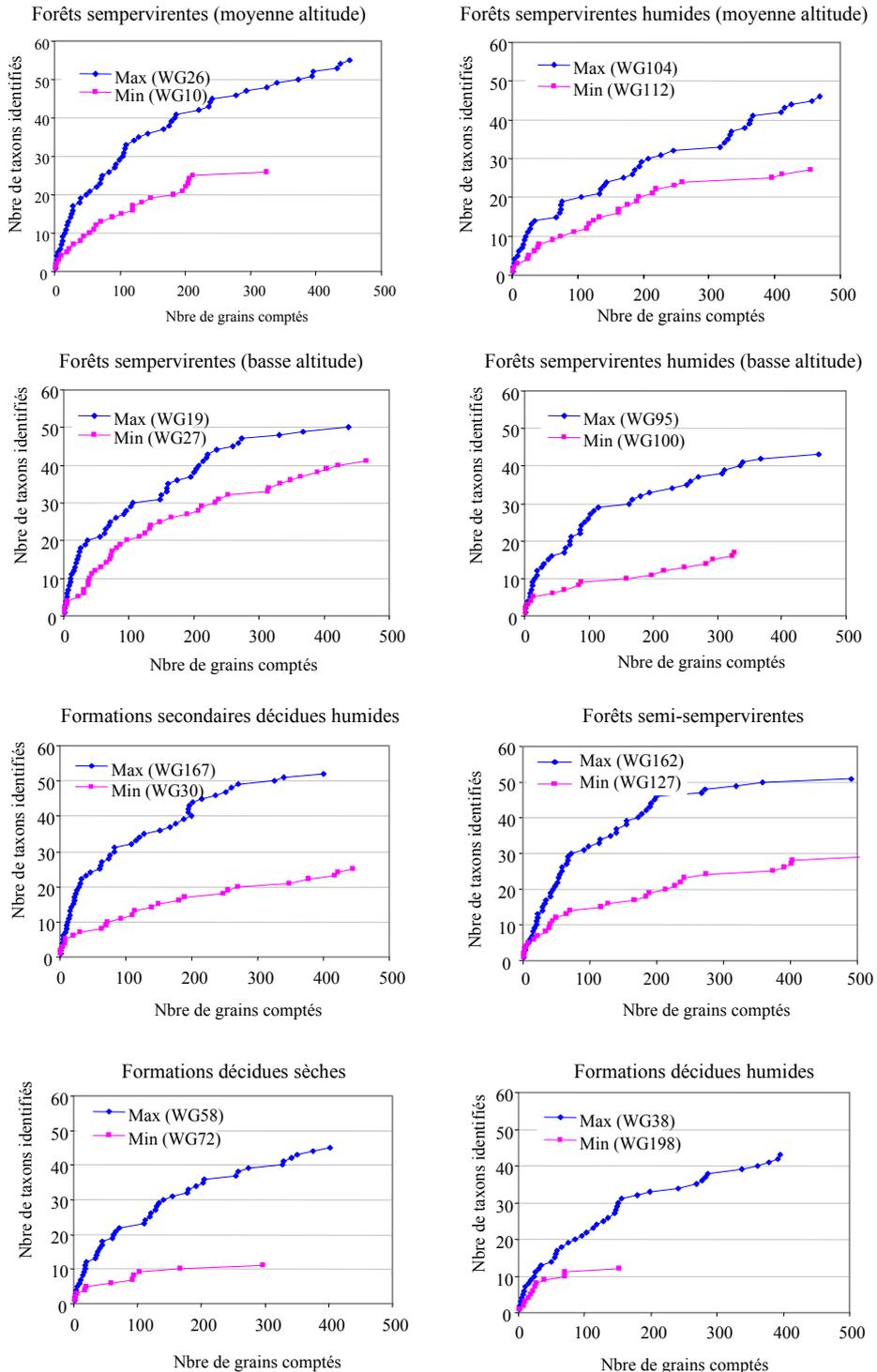
Σ Taxa IC : Nombre de taxons Introduits et/ou Cultivés

+ Forêt dégradée

++ Forêt fortement dégradée

ANNEXE II.2

Diversité taxonomique des spectres



Annexe II.2: Diversité taxonomique des spectres polliniques de plusieurs types de végétation, appréciée par la courbe représentant le nombre de taxons identifiés (AP, NAP et NC représentés) en fonction du nombre de grains comptés lors de l'analyse au microscope optique.

ANNEXE II.3

Liste des taxons polliniques identifiés pour les Ghâts Occidentaux

Dipterocarpaceae	<i>Hopea</i> type	<i>Vateria, Shorea</i>	AP	~	~	~	~	~	+	~	~		~	+	~	~	
Ebenaceae	<i>Diospyros</i>		AP	~	~	~		~		~	~		+	~	~	~	
Elaeagnaceae	<i>Elaeagnus</i>		AP								~						
Elaeocarpaceae	<i>Elaeocarpus</i>		AP	~	+	~	+	~	+	+	~	~	+++	+	++	++	+
Euphorbiaceae	<i>Acalypha</i>		NC		~	~		~		~				~	~	~	
Euphorbiaceae	<i>Antidesma</i>		AP			~			~						~	~	
Euphorbiaceae	<i>Aporosa</i>		AP	~	~	~	~	~	~	+	+++	++			+	~	+
Euphorbiaceae	<i>Baccaurea</i>		AP		~	~			~			~		~	~	~	
Euphorbiaceae	<i>Bischofia javanica</i>		AP		~	~	~	+	~	~	~	+	~	~	~	~	
Euphorbiaceae	<i>Bridelia</i>		AP			~		~		~		~					
			Structure de la plante	Décidue sèche			Décidue humide		Formation secondaire		Semi-sempervirente		Forêt sempervirente		Forêt sempervirente humide		Forêt sempervirente sèche
Famille	Taxon pollinique	Taxons inclus dans le type		Forêt	Forêt riveraine	Savane	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.
Euphorbiaceae	<i>Croton</i> type	<i>Aleurites, Suregada, Blachia, Dimorphocalyx, Farhenheitia, Gelonium</i>	NC	~	~	~		~		~			~	~		~	~
Euphorbiaceae	<i>Daphniphyllum neilgherrense</i>		AP			~	~			~				~	~		
Euphorbiaceae	<i>Drypetes</i> type	<i>Agrostistachys</i>	AP		~	~	~	~	~	~				~	~	~	
Euphorbiaceae	Euphorbiaceae		NC		~	~											
Euphorbiaceae	<i>Glochidion</i> type	<i>Emblica</i>	AP	+	~	+	+	++	~	+	~	~	~	~	~	~	~
Euphorbiaceae	<i>Mallotus</i> type	<i>Macaranga, Trewia, Cleidion</i>	AP	+++	+++	~	+	+	+++	~	+	+	++	+++	+++	+++	+
Euphorbiaceae	<i>Micrococca</i>		NC									+				~	
Euphorbiaceae	<i>Phyllanthus</i>		NC													~	
Euphorbiaceae	<i>Securinea</i> type	<i>Margaritaria</i>	AP			~		~	~		~		+	~	~	~	
Fabaceae	<i>Dalbergia</i>		AP		~												
Fabaceae	Fabaceae	<i>Abrus, Butea, Dalbergia, Derris, Flemingia, Ormosia, Durrbaria, Mucuna, ... except Pongamia</i>	NC	~	~	~	~	~	~	~	~	~		~	~	~	
Fabaceae	<i>Pongamia</i>		AP					~						~	~	~	
Flacourtiaceae	<i>Casearia</i>		AP		~			~	~					~		~	
Flacourtiaceae	<i>Flacourtia</i>		AP					~	~	~						~	

ANNEXE II.3

Liste des taxons polliniques identifiés pour les Ghâts Occidentaux

Menispermaceae	<i>Coscinium</i>		AP						~								
Menispermaceae	<i>Tinospora cordifolia</i>		C		~	~	~	~	~			+	~	~	~		
Mimosaceae	<i>Entada pursaetha</i>		C					~									~
Mimosaceae	<i>Xylia xylocarpa</i>		AP	~	~	~	~	~	~	~	~						
Moraceae	<i>Ficus</i>		AP	+	+	+	~	~	~	~	~	~	+	+	++		~
Moraceae/ Urticaceae	Moraceae/ Urticaceae	Antiaris (a), Artocarpus (a), Streblus (a) ; Boehmeria (ab), Debregeasia (a), Dendrocnide (a), Elatostema (h), Pellionia (h), Pilea (h), Villebrunea (ab)	NC	+	++	+	+	+	++	+	~	+	++	+	++	+	++
Myristicaceae	<i>Gymnacranthera canarica</i>		AP											~			
Myristicaceae	<i>Knema attenuata</i>		AP							~				~			
Myristicaceae	<i>Myristica</i>		AP		~				~	~			~	~	~		~
Myrsinaceae	<i>Ardisia</i>		AP			~		~					~				
Myrsinaceae	<i>Rapanea</i>		AP							~							
			Structure de la plante	Décidue sèche			Décidue humide		Formation secondaire		Semi-sempervirente		Forêt sempervirente		Forêt sempervirente humide		Forêt sempervirente sèche
Famille	Taxon pollinique	Taxons inclus dans le type		Forêt	Forêt riveraine	Savane	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.
Myrtaceae	<i>Syzygium</i> type	<i>Eugenia</i>	AP	~	+	+	+	+	++	+	+++	+++	+++	++	+	+++	++
Olacaceae	<i>Strombosia ceylanica</i>		AP		~						~				~		
Oleaceae	<i>Jasminum</i>		AP												~		
Oleaceae	<i>Ligustrum</i>		AP			~		~		~			~	~	~		
Oleaceae	<i>Olea dioica</i>		AP		~	~	+	+	+	~	+	~	+	++	~	~	
Oleaceae	<i>Olea glandulifera</i> type	<i>Chionanthus zeylanicus</i> , <i>C.ramiflora</i> , <i>C. virginica</i>	AP	+	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~		+	+
Pandanaceae	<i>Pandanus</i>		AP													~	
Piperaceae	<i>Peperomia</i>		C													~	
Piperaceae	<i>Piper</i> type	<i>Lepianthes</i>	C	+	~	~		+	~	~	~	~	~	+	~	~	~
Poaceae	Poaceae		NAP	++	++	+++	++	+++	++	+++	++	+++	++	+++	+	++	++
Podocarpaceae	<i>Decussocarpus</i>		AP													~	
Polygalaceae	<i>Xanthophyllum flavescens</i>		AP										~				

Rutaceae	<i>Zanthoxylum</i>		AP		~					~					~		
Sabiaceae	<i>Meliosma</i>		AP	~	+	~	~	~	++	~	~		+	~	+	+	~
Sapindaceae	<i>Allophylus</i>		C					~	~	~	~	~	~	~		~	
Sapindaceae	<i>Dimocarpus longan</i>		AP		~								~	~	~		
Sapindaceae	<i>Dodonaea viscosa</i>		AP		~	+	~	~	~	~	~	~	~	~		~	~
Sapindaceae	<i>Filicium decipiens</i>		AP	+	++	~		~		~			~	~		+	++
Sapindaceae	<i>Harpullia arborea</i>		AP						+	~						~	
Sapindaceae	<i>Otonophelium stipulaceum</i>		AP			~											
Sapindaceae	<i>Schleichera oleosa</i>		AP		~	+	++	+	~	+	+	++	+	~	+	~	
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum lanceolatum</i>		AP						~	~		~			~	~	
Sapotaceae	<i>Isonandra</i>		AP		~					~			~		~	~	~
Sapotaceae	<i>Madhuca</i>		AP	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	+	~
Sapotaceae	<i>Mimusops elengi</i>		AP			~				~					~		
Sapotaceae	<i>Palaquium</i>		AP			~		~			~			~	~	~	
Sapotaceae	Sapotaceae	?	AP				~	~					~	~	~	~	
Sapotaceae	<i>Xantolis tomentosa</i>		AP					~	~	~	~	~			~		
Solanaceae	Solanaceae		NC		~	~		~	~	~	~	~		~	~	~	
Staphyleaceae	<i>Turpinia</i>		AP	~						~					~		
Sterculiaceae	<i>Helicteres isora</i>		AP													~	
Sterculiaceae	<i>Heritiera papilio</i>		AP					~					~				
Sterculiaceae	<i>Pterospermum</i>		AP	~	~												
Symplocaceae	<i>Symplocos</i>		AP						~	~	~			~		~	
Tetramelaceae	<i>Tetrameles nudiflora</i>		AP	~	+	~	+	+	~	+	+	+	++	+	+++	+	+++
Theaceae	<i>Eurya japonica</i>		AP		~								~	~	~	~	
Theaceae	<i>Gordonia obtusa</i>		AP			~		~	~	~			~	~	~	~	
Tiliaceae	<i>Grewia</i>		AP	~	~	~	~	+	~	~	~	~	~	~	~	~	~
			Structure de la plante	Décidue sèche			Décidue humide		Formation secondaire		Semi-sempervirente		Forêt sempervirente		Forêt sempervirente humide		Forêt sempervirente sèche
Famille	Taxon pollinique	Taxons inclus dans le type		Forêt	Forêt riveraine	Savane	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Forêt	Savanne arborée	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.	Moyenne alt.	Basse alt.
Ulmaceae	<i>Celtis</i>		AP	~	~	~	~	~	+	~	~	~	~	~	~	~	
Ulmaceae	<i>Gironniera</i>		AP			~											
Ulmaceae	<i>Holoptelea integrifolia</i>		AP			~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
Ulmaceae	<i>Trema orientalis</i>		AP	~	+	~	+	~	~	+	~	~	+	+	~	~	+
Verbenaceae	<i>Tectona grandis</i>		AP	~	~	+	~	~	~		~	~	~				

Verbenaceae	<i>Vitex</i>		AP							~							
Zygophyllaceae	<i>Tribulus</i>		NAP											~			
Non déterminé	Non déterminé		NC	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spores	Monolete spores		SP	~	~	~	~	~	+	+	~	~	~	+	~	+	+
Spores	Trilete spores		SP	+	+	+	~	+	+	+	~	+	+	++	+++	+	~

Annexe II.3 : Liste des 183 taxons polliniques identifiés dans les forêts sempervirentes et décidues à basse et moyenne altitude (<1500 m) des Ghâts occidentaux, Inde du Sud. L'abondance des taxons polliniques est représentée en fonction des types de formations : +++ , pourcentages >10%; ++, pourcentages compris entre 5 et 10%; +, pourcentages entre 1 et 5%; ~ pourcentages <1%. AP: Arboreal Pollen; C, Climber (liane); NAP, Non Arboreal Pollen; NC, Non Classé, SP, spores ptéridophytes.

NOTES

L'identification des grains de pollens s'est faite à différents niveaux taxonomiques. L'identification au niveau spécifique a été atteinte pour un certain nombre de taxons (environ 22%), comme *Aglaiia simplicifolia*, *Calophyllum apetalum*, *Calophyllum polyanthum* qui possèdent des caractéristiques morphologiques propres à l'espèce et distinctes des autres espèces du genre. D'autres taxons, comme *Bischofia javanica*, *Chrysophyllum lanceolatum* qui sont les seuls représentants du genre dans la région des Ghâts occidentaux ont également été identifiés au niveau spécifique (Tissot et al., 1994). Dans la majorité des cas (environ 46%), le niveau générique a atteint. Parfois (environ 15%), seule l'identification au niveau de la famille a pu être atteinte, lorsque l'on a été en mesure de reconnaître la morphologie et/ou l'ornementation caractéristique de certaines familles botaniques. C'est le cas par exemple pour les Fabaceae, Anacardiaceae, Apiaceae, etc... (c. f. Annexe III.1). Lorsqu'un pollen présente les mêmes caractéristiques qu'un autre d'un genre différent, il a été identifié au niveau du « type pollinique ». Cela a été le cas par exemple pour les pollens de *Vateria*, *Shorea et Hopea* (Dipterocarpaceae), identifiés sous le « Type *Hopea* ». Lorsqu'une même morphologie pollinique caractérise deux familles distinctes, comme c'est le cas par exemple pour les Moraceae et les Urticaceae (pollens 2-3 porés, lisses ou scabres selon les espèces) ou encore les Melastomataceae et les Combretaceae (pollens pseudo-sulqués), alors le pollen a été identifié sous les termes Moraceae/Urticaceae, Melastomataceae/Combretaceae. Enfin, les grains de pollen présentant un bon état de conservation, mais ne correspondant à aucun des types connus, ont été comptés et classés dans la catégorie des « non déterminés ».

Parmi les 195 taxons polliniques identifiés, 135 représentent des arbres ou arbustes (AP pour Arboreal Pollen), 10 représentent des lianes ou plantes grimpantes (C pour Climber), 24 des plantes herbacées (NAP pour Non Arboreal Pollen), 15 représentent à la fois des arbres et des plantes herbacées (NC pour Non classified), 2 représentent des plantes aquatiques (AQ, pour Aquatic) et 9 représentent des plantes introduites et/ou cultivées (*Cocos*, *Tamarindus*, *Ricinus*, *Acacia*, *Eucalyptus*, *Alnus*, *Casuarina*, *Pinus*, *Mimosa*).

ANNEXE II.4 Stations météorologiques de l'Institut Français de Pondichéry, Inde

Villes	Longitude °E	Latitude °N	Altitude (m)	Années	Total nombre d'années
1 Agumbe	75°01'	13°31'	675	1942 à 1979	38
2 Allepey	76°19'	9°29'	4	1944 à 1975	32
3 Ambassamudram	77°27'	8°42'	67	1941 à 1986	46
4 Attingal	76°49'	8°42'	15	1941 à 1975 *	34
5 Balehonnur	75°27'	13°22'	907	1941 à 1979	39
6 Belgaum	74°32'	15°52'	753	1941 à 1979	39
7 Bhagamandala	75°31'	12°23'	876	1941 à 1979 *	37
8 Bonaccord (Tea Factory)	77°10'	8°41'	544	1963 à 1992 *	30
9 Calicut	75°47'	11°15'	5	1941 à 1975	35
10 Chandragutti	74°58'	14°26'	610	1942 à 1979 *	33
11 Cheranmahadevi	77°34'	8°41'	46	1943 à 1986	44
12 Cochin	76°14'	9°58'	3	1941 à 1974	34
13 Dubare	75°55'	12°22'	850	1933 à 1979	47
14 Fraserpet (Kushalnagar)	75°58'	12°27'	846	1934 à 1979 *	40
15 Haliyal	74°46'	15°20'	550	1901 à 1977	77
16 Hudugur	75°56'	12°29'	856	1941 à 1979	39
17 Isfield Estate	77°5'	9°00'	450	1940 à 1976	37
18 Jog Colo	74°48'	14°13'	472	1944 à 1979 *	34
19 Kakankotte	76°12'	11°54'	712	1925 à 1974 *	46
20 Kaliyar	76°46'	9°58'	70	1940 à 1977 *	37
21 Kannadian Anicut	77°26'	8°41'	76	1943 à 1986	44
22 Kargal Colony	74°48'	14°13'	533	1942 à 1979 *	37
23 Karwar	74°7'	14°47'	4	1946 à 1979	34
24 Kudige	75°57'	12°30'	800	1950 à 1979	30
25 Kumili	77°10'	9°37'	884	1941 à 1973 *	29
26 Makut	75°44'	12°05'	94	1933 à 1979 *	46
27 Manimutar	77°25'	8°39'	76	1954 à 1986	33
28 Mercara	75°44'	12°25'	1152	1901 à 1979	79
29 Mundgod	75°02'	14°58'	572	1901 à 1979	79
30 Munnar	77°04'	10°05'	1461	1916 à 1976	61
31 Mysore	76°42'	12°18'	767	1941 à 1979 *	38
32 Nanguneri	77°39'	8°29'	96	1941 à 1986	46
33 Neriamangalam	76°47'	10°03'	46	1941 à 1970	30
34 Palayamkottai	77°44'	8°43'	46	1941 à 1986	46
35 Palghat	76°39'	10°46'	97	1943 à 1975	33
36 Punalur	76°55'	9°00'	34	1941 à 1975	35
37 Sampaji	75°33'	12°30'	140	1933 à 1979	47
38 Shimoga	75°38'	13°56'	571	1901 à 1979	79
39 Siddapur	74°53'	14°21'	610	1901 à 1979	79
40 Sirsi	74°50'	14°37'	625	1901 à 1979	79
41 Somwarpet	75°51'	12°36'	1131	1901 à 1979	79
42 Sorab	75°06'	14°23'	581	1941 à 1979	39
43 Supa	74°30'	15°16'	490	1901 à 1979	79
44 Thalaguppa	74°55'	14°13'	591	1942 à 1979 *	37
45 Thirumbadi Estate	76°00'	11°21'	100	1940 à 1978	29
46 Tittimathi	76°00'	12°13'	860	1933 à 1979	47
47 Trivandrum 1	76°57'	8°29'	64	1941 à 1975	35
48 Vythiri	76°02'	11°33'	860	1941 à 1975	35
49 Yellapur	74°43'	14°58'	550	1901 à 1979	79

Annexe II.4: Liste des 49 stations pluviométriques collectées par l'Institut français de Pondichéry (Inde), pour lesquelles il y a plus de 29 ans d'enregistrement. * indique les périodes de temps pour lesquelles il manque parfois une ou plusieurs années d'enregistrement.

ANNEXE II.5**Stations météorologiques de Leemans et Cramer (1991)**

	Nom de station	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Altitude (m)
1	?	77°12'	15°30'	398
2	A l'ouest de Belgaum	74°18'	15°48'	781
3	Balehonnur	75°27'	13°22'	907
4	Bangalore	77°37'	12°57'	920
5	Belgaum	74°32'	15°52'	753
6	Bellary	76°51'	15°09'	449
7	Beypore	75°48'	11°00'	9
8	Chickmaglur	75°44'	12°25'	1152
9	Chittradurga	76°26'	14°14'	733
10	Cochin	76°14'	9°58'	3
11	Gadgad	75°38'	15°25'	650
12	Hassan	76°09'	13°00'	960
13	Kodaikanal	77°28'	10°14'	2343
14	Kozhikode	75°47'	11°15'	5
15	Kumta	74°27'	14°17'	29
16	Kurnool	77°54'	15°48'	281
17	Mandya	76°42'	12°18'	767
18	Mangalore	74°51'	12°52'	22
19	Mettupalayam	76°48'	11°21'	1747
20	Navalgund	75°24'	15°30'	648
21	Palladam	77°06'	10°54'	410
22	Trivandrum	76°57'	8°29'	64

Annexe II.5: Liste des stations météorologiques du fichier climatique global (Leemans & Cramer, 1991)

N° de l'échantillon	TANN (°C)	MTCO (°C)	PANN (mm/an)	E/PE (%)	PET	AET
WG1	23,4	21,6	1844	69,4	1494	1037
WG2	23,7	21,9	1865	69,9	1500	1048
WG3	23,5	21,7	2153	70,2	1495	1049
WG5	22,1	20,3	2162	70,7	1466	1036
WG6	23,3	21,5	2402	70,4	1491	1050
WG7	23,6	21,8	2532	70,6	1496	1056
WG8	23,3	21,5	2459	70,6	1490	1052
WG9	22,8	21,0	3217	71,7	1478	1060
WG10	22,6	20,8	3273	71,8	1475	1059
WG11	22,9	21,1	3568	71,9	1479	1064
WG12	23,5	21,7	3279	71,8	1490	1071
WG13	23,4	21,6	3448	70,7	1489	1053
WG14	22,7	20,9	4119	69,8	1482	1034
WG15	23,3	21,5	3731	69,4	1492	1036
WG18	25,1	23,4	3459	69,3	1524	1056
WG19	26,1	24,5	3396	70,2	1543	1083
WG20	26,9	25,2	3185	69,9	1558	1088
WG21	25,7	24,0	3069	68,6	1538	1055
WG22	24,4	22,6	3057	67,6	1516	1025
WG23	22,6	20,8	3383	67,7	1486	1006
WG26	23,6	21,8	3102	65,9	1508	994
WG27	26,4	24,8	3087	67,0	1556	1042
WG28	27,5	25,9	3224	68,1	1573	1071
WG29	27,6	26,0	3375	67,8	1577	1070
WG30	27,3	25,6	3245	67,7	1572	1063
WG31	22,5	20,7	2203	66,3	1491	989
WG32	20,5	18,5	2852	68,5	1456	997
WG36	22,3	20,4	1884	65,9	1486	979
WG37	22,2	20,3	1764	65,8	1484	976
WG38	21,8	19,9	2185	66,7	1477	985
WG40	22,8	20,9	2160	65,6	1493	979
WG41	22,8	21,0	2355	65,9	1493	984
WG42	22,7	20,9	2163	67,8	1488	1008
WG43	22,8	20,9	1925	67,6	1488	1006
WG44	22,4	20,5	1838	67,4	1481	999
WG46	27,1	25,5	3219	81,6	1544	1260
WG47	26,1	24,5	3148	80,9	1526	1234
WG48	24,8	23,1	3119	79,9	1498	1196
WG49	26,5	24,9	3015	84,0	1526	1282
WG50	20,4	18,5	5093	93,3	1216	1135
WG51	22,8	21,0	3739	90,0	1325	1192
WG52	26,6	25,0	2642	86,3	1470	1268
WG53	26,9	25,3	2669	85,5	1485	1269
WG54	22,8	21,0	1992	71,1	1479	1051
WG55	23,2	21,4	1558	71,4	1485	1061
WG56	22,8	21,0	1310	71,0	1478	1049
WG57	22,5	20,7	1201	70,6	1473	1040
WG58	26,9	25,3	2339	87,4	1460	1277
WG60	25,6	23,9	2713	88,5	1411	1249
WG61	25,8	24,2	2651	88,2	1422	1254
WG62	26,0	24,4	2599	88,0	1429	1258
WG63	26,1	24,5	2591	87,9	1431	1258
WG64	26,1	24,5	2586	87,9	1432	1259
WG65	26,1	24,5	2582	87,9	1431	1258
WG66	25,8	24,2	2648	88,2	1421	1253
WG70	25,8	24,2	2680	88,1	1424	1254

WG71	26,5	24,9	2439	87,9	1443	1268
WG72	27,5	25,9	2192	87,1	1473	1284
WG74	25,1	23,4	2674	90,1	1371	1234
WG76	21,6	19,8	3907	94,7	1209	1145
WG77	20,4	18,5	4842	96,3	1154	1111
WG80	19,6	17,7	5640	97,7	1113	1087
WG81	19,2	17,3	5953	98,4	1094	1076
WG82	20,2	18,4	4937	96,1	1156	1111
WG83	19,1	17,1	5610	98,9	1074	1063
WG84	19,4	17,5	5321	98,4	1091	1074
WG86	20,1	18,2	4807	97,4	1123	1094
WG87	20,7	18,9	4352	96,3	1158	1116
WG88	21,0	19,2	4175	95,9	1171	1123
WG89	21,2	19,4	4049	95,6	1181	1129
WG90	21,5	19,7	3901	95,2	1194	1137
WG91	21,7	19,9	3751	94,8	1209	1146
WG92	21,9	20,1	3680	94,6	1215	1150
WG93	23,0	21,3	3228	93,1	1267	1180
WG95	24,8	23,1	3168	85,8	1456	1249
WG96	25,3	23,6	3111	85,7	1468	1259
WG97	25,9	24,3	2877	85,3	1485	1266
WG98	26,1	24,4	2890	85,1	1489	1268
WG99	26,2	24,6	2880	85,1	1492	1270
WG100	26,3	24,7	2887	85,0	1496	1272
WG101	25,8	24,1	2963	84,9	1483	1259
WG102	26,8	25,2	2905	85,5	1511	1291
WG104	21,3	19,5	3583	87,6	1324	1159
WG105	21,4	19,5	3507	87,6	1325	1161
WG106	21,3	19,5	3497	87,7	1322	1160
WG107	21,5	19,7	3427	87,6	1329	1164
WG108	21,1	19,3	3594	87,7	1317	1155
WG109	21,2	19,4	3704	87,6	1323	1158
WG111	20,5	18,6	4134	88,3	1295	1143
WG112	21,5	19,6	3790	87,1	1335	1164
WG113	22,0	20,2	3588	86,7	1356	1176
WG114	22,0	20,2	3588	86,7	1356	1176
WG115	23,4	21,7	3239	86,0	1404	1207
WG116	23,9	22,2	3143	85,8	1422	1220
WG119	22,2	20,3	2853	87,5	1377	1205
WG121	22,2	20,4	2808	87,4	1378	1205
WG122	22,2	20,4	2806	87,5	1377	1205
WG123	22,1	20,3	2834	87,6	1374	1204
WG125	27,7	26,0	3874	58,6	1640	961
WG126	27,9	26,3	3834	58,3	1643	958
WG127	27,3	25,6	4295	59,4	1637	972
WG128	27,6	25,9	4217	59,0	1641	967
WG129	27,6	26,0	4083	58,8	1640	965
WG130	28,0	26,3	4026	58,5	1644	961
WG131	26,4	24,7	3548	60,0	1610	967
WG133	25,6	23,8	2176	58,3	1610	938
WG134	26,0	24,2	2140	57,7	1615	933
WG135	26,0	24,2	2147	57,7	1615	933
WG136	25,6	23,8	2299	58,6	1610	943
WG138	25,1	23,3	3012	60,9	1610	980
WG139	25,2	23,5	3306	61,1	1607	982
WG140	25,3	23,5	2344	59,2	1599	946
WG141	25,2	23,4	2357	59,3	1597	947
WG142	25,2	23,4	2390	59,4	1597	948

WG143	25,1	23,4	2436	59,6	1596	951
WG144	25,0	23,2	2556	60,4	1578	953
WG145	24,9	23,1	2457	60,3	1577	951
WG146	25,1	23,3	2066	59,4	1578	938
WG147	25,1	23,3	2377	60,0	1580	947
WG148	24,6	22,9	2698	61,0	1575	960
WG149	25,4	23,7	2951	60,5	1589	961
WG150	25,3	23,5	2394	59,2	1600	948
WG151	25,2	23,4	2426	59,5	1596	950
WG152	27,8	26,2	3552	59,6	1620	965
WG153	27,6	26,0	3737	59,7	1619	966
WG154	27,9	26,3	3633	59,5	1622	966
WG155	26,7	25,0	3670	60,3	1606	968
WG156	27,6	26,0	3561	59,6	1618	965
WG157	26,6	24,9	3700	60,4	1603	969
WG124A	22,0	20,2	2808	87,6	1372	1202
WG16B	23,3	21,6	3661	69,0	1494	1031
WG16A	23,3	21,6	3661	69,0	1494	1031
WG17A	23,2	21,4	3772	69,0	1491	1030
WG17B	23,2	21,4	3772	69,0	1491	1030
WG24A	21,6	19,7	4467	68,9	1471	1013
WG24B	21,8	19,9	4383	68,7	1473	1012
WG25A	21,2	19,3	5555	69,9	1468	1026
WG25B	21,7	19,8	3699	67,4	1477	996
WG78A	19,7	17,8	5315	97,5	1118	1090
WG78B	19,7	17,8	5315	97,5	1118	1090
WG94	24,8	23,1	3223	85,6	1457	1247
WG94T	23,7	22,0	2987	92,3	1298	1198
WG158	21,5	19,6	5324	69,3	1494	1036
WG159	21,4	19,4	5417	69,6	1492	1038
WG160	22,2	20,3	4792	67,8	1505	1021
WG161	22,3	20,5	4700	67,5	1507	1018
WG162	24,2	22,4	3554	63,8	1545	985
WG165	23,9	22,1	3206	63,9	1536	981
WG166	24,0	22,2	3766	64,2	1542	990
WG167	24,2	22,4	2983	63,1	1544	975
WG168	25,0	23,2	1381	56,0	1585	887
WG169	25,0	23,2	1344	55,5	1586	880
WG170	25,2	23,4	1349	55,3	1590	880
WG171	25,5	23,7	1351	54,8	1599	876
WG172	25,6	23,8	1535	56,3	1599	900
WG173	25,1	23,3	1688	57,6	1594	918
WG174	25,8	24,0	1774	57,2	1605	918
WG175	25,6	23,8	1841	57,5	1603	922
WG176	25,6	23,9	2142	58,2	1606	935
WG178	25,5	23,7	1394	54,9	1602	880
WG179	25,5	23,7	1140	52,1	1602	835
WG180	25,4	23,6	1170	52,5	1602	841
WG181	25,7	24,0	2036	57,7	1615	931
WG183	24,3	22,5	2353	58,6	1599	937
WG184	25,4	23,7	3653	61,4	1610	988
WG185	25,2	23,4	3907	62,1	1606	997
WG186	25,1	23,3	4084	62,5	1604	1003
WG187	24,9	23,2	4167	62,9	1602	1007
WG188	25,2	23,5	4061	62,2	1605	998
WG189	26,2	24,4	3881	60,5	1618	980
WG190	23,7	21,8	1285	58,5	1541	901
WG191	23,7	21,9	1395	59,6	1542	918

WG192	24,2	22,4	1552	60,1	1547	930
WG193	23,7	21,9	1601	60,6	1540	933
WG194	24,5	22,7	1864	60,8	1552	944
WG195	24,6	22,8	1798	60,8	1551	944
WG196	23,7	21,8	1051	57,0	1531	873
WG197	24,4	22,6	1239	59,6	1543	919
WG198	24,3	22,5	1163	58,8	1541	906
WG199	24,1	22,3	1162	58,7	1538	902

Annexe II.6 : Valeurs interpolées aux sites polliniques actuels de température moyenne du mois le plus froid (MTCO, °C), précipitations annuelles (Pann, mm/an) et d'humidité (E/PE, %).