

un transport pollinique vers Clipperton ?

Existe-t-il

Denis-Didier Rousseau, Patrick Schevin, Jackie Ferrier, Marie-Pierre Ledru, Danielle Duzer

Résumé

Dans le cadre de cette mission, le projet avait pour objectif de réaliser un suivi de la pluie pollinique au niveau de l'atmosphère de cet atoll, en distinguant l'apport en pollen de la végétation locale, relativement restreinte, du pollen allochtone, et plus particulièrement d'Amérique centrale. Aux basses latitudes de cette région, du pollen émis dans l'atmosphère par les plantes actives, repris par les masses d'air, a été transporté pour être piégé dans les filtres exposés à Clipperton. Bien que l'exposition des filtres ait été réalisée durant toute la mission, seuls les résultats concernant le piégeage maximum de pollen, en termes de nombre de taxons végétaux représentés mais également de grains comptés, sont évoqués ici. Nous présentons les preuves de transport longue distance de pollen originaire d'Amérique centrale du 14 au 28 février 2005. Celui-ci est intervenu par le biais de différentes masses d'air ayant balayé aussi bien le Mexique que le Nicaragua, les Petites Antilles et Panama.

Abstract

The project carried out as part of Clipperton expedition aimed to monitor the modern pollen rain in the atmosphere of this atoll, distinguishing the pollen relatively small contribution of the local vegetation from allochthonous pollen and, more particularly, from Central America. At low latitudes in these regions, pollen emitted into the atmosphere by the active plants, then captured by air masses was sampled by filters exposed at Clipperton. While the filters were exposed throughout the mission, only the results on the maximum-trapped pollen (in terms of number of plants represented but also of grains counted) are discussed here. We present evidence of long-distance transport of pollen, originating from Central America, between 14 to 28 February 2005. This has occurred by means of different air masses that swept across Mexico and Nicaragua, the Lesser Antilles and Panama.

INTRODUCTION

Si le but de la mission organisée sur Clipperton par J.-L. Étienne était de dresser un bilan de la biodiversité de cet atoll de l'océan Pacifique, l'occasion était également rêvée de poursuivre la collaboration entamée avec lui lors de sa précédente mission "Banquise" en 2002, en acceptant de lui confier une nouvelle fois une girouette porte-filtres et un jeu de filtres de gaze siliconée afin de réaliser une chasse au pollen pour le moins insolite. En effet, le projet consistait à rechercher si, comme en pleine banquise au pôle Nord, du pollen totalement étranger à l'environnement local, et par conséquent, transporté sur de très longues distances, pouvait être récolté dans le cas présent à plus basse latitude. Les différents travaux réalisés à ce jour sur le très long transport du pollen ont montré qu'il était possible d'en recueillir partout sur la planète, à condition de le piéger d'une manière appropriée (Cambon 1994; Cambon *et al.* 1992; Cour 1974; Cour *et al.* 1993; Rousseau *et al.* 2003, 2004, 2006). Diverses études réalisées ou en

cours consistent à installer des capteurs de pollen en des endroits déterminés et à les relever au bout d'un an (Bourgeois 2000; Bourgeois *et al.* 1985, 2001; Campbell *et al.* 1999; Hjelmroos & Franzen 1994; Jacobs *et al.* 1985; Janssen 1973; Nichols 1967; Ritchie 1974; Ritchie & Lichti-Federovich 1967; Short & Holdsworth 1985). Toutefois ces études ne donnent qu'une image bien partielle de ce transport, car la date d'arrivée des grains ne peut être connue très précisément. Notre objectif était de pouvoir donner des enregistrements particulièrement précis, à l'échelle de la quinzaine de jours, voire de la semaine, d'un possible transport de pollen très longue distance vers Clipperton. À l'occasion de la mission "Clipperton", les mêmes appareillage et protocole d'exposition que ceux de la mission "Banquise" ont été utilisés durant toute la durée du séjour sur cette île perdue du Pacifique, où la végétation locale, bien connue, est particulièrement réduite à quelques cocotiers, des graminées et des cypéracées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Localisé à 10°18'N et 109°13'W, soit à 1280 km de la côte occidentale mexicaine, et exposé au régime des alizés, l'atoll de Clipperton se situe au niveau de la zone de convergence intertropicale, qui conditionne la direction et l'origine des masses d'air le balayant (Leroux 1996). L'atoll se trouve

ainsi dans la zone des vents faibles de surface ou calmes de la région équatoriale de basse pression (Fig. 317). Clipperton s'avère donc un observatoire d'autant plus privilégié d'un éventuel transport de pollen longue distance, qu'il est soumis à un climat tropical humide, avec une végétation restreinte

à des cocotiers et des herbes, ce qui permet une reconnaissance facile de grains "exotiques" sur nos filtres. Une girouette porte-filtres ainsi qu'un lot de filtres destinés à être exposés au vent durant toute la durée de la mission à Clipperton, ont été confiés à J.-L. Étienne. Le protocole consistait à exposer un filtre durant deux semaines (filtres A) alors que deux autres étaient exposés alternativement durant une semaine chacun (filtres B). Ainsi pour un filtre A (semaines 1 et 2) correspondent deux filtres B, notés respectivement B1 (semaine 1) et B2 (semaine 2) (Fig. 318).

Une fois exposés, les filtres ont été changés en

début de semaine, le lundi, étiquetés et rangés dans des sachets prévus à cet effet jusqu'à la fin de l'expédition, puis expédiés à l'Université de Montpellier dans l'équipe Paléoenvironnements de l'Institut des Sciences de l'Évolution, UMR CNRS-UM2 5554. Ils y ont été préparés selon le même procédé utilisé pour les analyses aéropalynologiques (Cambon *et al.* 1992; Cour *et al.* 1993; Cambon 1994). Il consiste à dissoudre une moitié de filtre avec différentes attaques acides (acide sulfurique pour dissoudre la gaze, puis acide fluorhydrique et acide chlorhydrique pour solubiliser la silice, enfin, acide acétique anhydre et acide sulfurique, acétolyse,

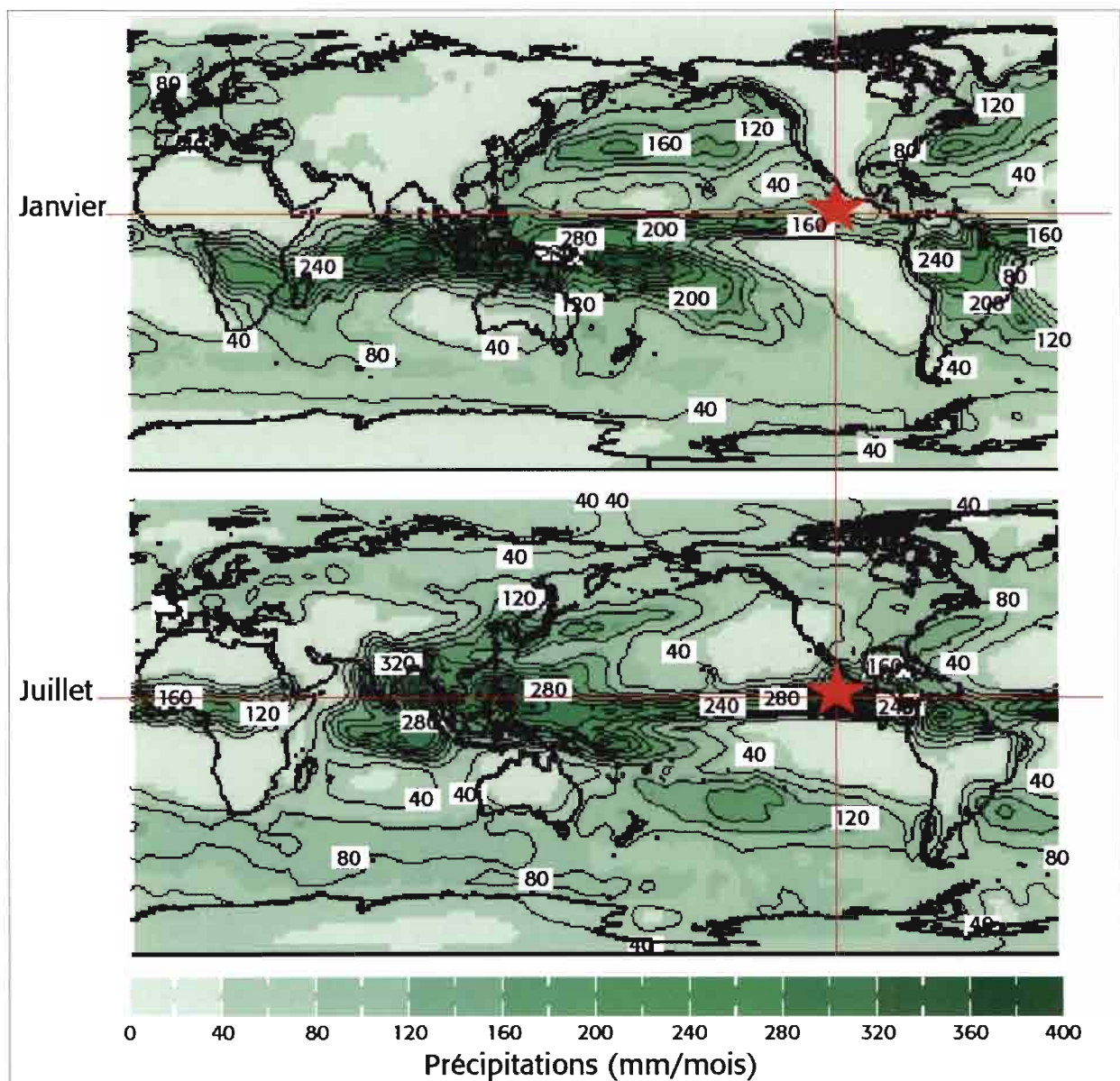


Figure 317 : distribution des précipitations en janvier et juillet à l'échelle globale. La zone de forte précipitation à l'équateur correspond à la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). C'est une zone de basse pression, où les alizés nord-est et sud-est convergent vers l'équateur. Cette bande migre en fonction des saisons, position la plus méridionale en décembre et la plus septentrionale en juillet, principalement sur les continents, en direction de la zone recevant le plus de chaleur du soleil. La ZCIT reste positionnée au nord de l'Équateur sous les longitudes océaniques, impliquant une influence des alizés de l'hémisphère Nord sur Clipperton (étoile rouge).

(données <http://iri.ldeo.columbia.edu/~bgordon/ITCZ.html>). NOAA NCEP CPC CAMS—OPI climatology precipitation

Distribution of rainfall in January and July. The area of heavy precipitation at the equator is the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). This is an area of low pressure, where the north-east and south-east trade winds converge towards the equator. This band migrates according to the seasons, the southernmost position in December and the most northerly in July, mainly on the continent, toward the area receiving the most heat from the sun. The ITCZ is still located in northern Ecuador in the oceanic longitudes, implying an influence of northern hemisphere trade winds on Clipperton (red star).

(data <http://iri.ldeo.columbia.edu/~bgordon/ITCZ.html>). NOAA NCEP CPC CAMS—OPI precipitation climatology



Figure 318 : installation utilisée à Clipperton pour la capture du pollen. Un filtre est exposé durant deux semaines (filtres A). Durant cet intervalle de temps, deux filtres sont successivement exposés chaque semaine (filtres B) fournissant ainsi la série AxB1, AxB2 pour une quinzaine déterminée.
Device used to collect pollen at Clipperton. A filter is exposed for two weeks (filters A). During this interval, two filters are successively exposed each week (filters B) providing the series AxB1, AxB2 for a determined fortnight.

pour vider le pollen de son contenu cellulaire). Le résidu contenant les éventuels grains de pollen est monté entre lame et lamelle. La lame pollinique ainsi produite est analysée sous microscope optique avec un agrandissement de 600 fois. Le comptage des grains correspond à une valeur statistique. Il est arrêté dès que la courbe "nombre de taxons identifiés en fonction du nombre de grains comptés" se rapproche d'une asymptote horizontale correspondant au nombre maximum de taxons présents dans le culot, selon la méthode de Birks & Birks (1980), Faegri & Iversen (1989), et reprise par Weng *et al.* (2006). Lorsqu'un filtre A révèle la présence de grains de pollen ne correspondant pas à la végétation locale, les filtres B sont préparés et analysés de la même manière afin d'augmenter la résolution temporelle de l'étude. La répartition des plantes est connue, sur la base d'atlas de végétation, pour différentes régions du globe et notamment dans le cas de

Clipperton, de l'Amérique du Nord, centrale et du Sud. Le modèle HYSPLIT (HYSPLIT4Model 1997; Draxler & Hess 1998), disponible en ligne sur le site du NOAA américain, permet d'étudier à la fois la dispersion de particules de toute nature, comme les grains de pollen, et d'en retracer les trajectoires en remontant dans le temps, depuis leur lieu de sédimentation ou de capture (rétrotrajectoires). Nous avons donc recherché les rétrotrajectoires correspondant aux masses d'air susceptibles d'avoir transporté les grains depuis leur zone d'émission dans l'atmosphère. Nous avons utilisé HYSPLIT pour chaque journée de l'intervalle d'exposition en mode rétrotrajectoire durant 315 heures, avec les données météorologiques FNL, disponibles au NOAA. Toutefois compte tenu des objectifs de ce livre, nous ne donnerons ici que les résultats obtenus pour une quinzaine de jours particuliers, la plus riche en termes de taxons identifiés.

RÉSULTATS

Le filtre A4, exposé du 14 au 28 février 2005, s'est avéré le plus riche en pollen de tous ceux qui ont été exposés durant la mission. Sur 3082 grains comptés, 93 catégories différentes, incluant des grains abîmés et d'autres indéterminés, ont été recensées (Tab. LII et Fig. 319).

Parmi les 93 taxons proprement dits, trois sont considérés comme correspondant à la végétation locale (Cyperaceae, *Heliotropium*, cf. Convolvulaceae) pour respectivement 21, 27, 2, grains soit 1,62% du total des grains comptés (Tab. LII).

Parmi les taxons "exotiques", donc transportés sur de longues distances, *Alnus*, Moraceae, Asteraceae Liguliflorae, Urticaceae, *Mimosa scabrella*, Melastomataceae-Combretaceae représentent respectivement 1885, 305, 124, 116, 70, et 46 grains. L'aulne est très bien représenté avec de fortes fréquences relatives, son grain de pollen anémophile favorise ce transport sur de très longues distances et c'est un arbre

très répandu qui se développe du nord de l'Amérique du Nord jusqu'en Amérique du Sud. Le pin, également à pollen anémophile et se développant sur la totalité du continent sud-américain, est par contre peu représenté, 16 grains au total (soit 0,52%). La très grande majorité des grains identifiés (soit 96,01%) sont étrangers à l'atoll. Les grains de pollen captés par le filtre durant cette période de quinze jours sont donc très majoritairement transportés, et sur de très longues distances: au minimum les 1280 km séparant la côte centre-américaine de l'atoll (Fig. 320).

Un jeu de cartes correspondant aux journées d'exposition des filtres a été établi à partir du modèle HYSPLIT, où figure les rétrotrajectoires calculées toutes les demi-journées à partir de midi à Clipperton. Comme cela a été réalisé dans des études précédentes, on considère le niveau du sol et les niveaux 1000 m et 3000 m. Dans le cas de la première catégorie, "niveau du sol" ne signifie pas que la masse d'air

Tableau LI : liste des taxons identifiés dans le filtre A4 exposé à Clipperton (analyse P. Schevin). Dénombrements et pourcentages.
 List of taxa identified in the A4 filter exposed at Clipperton (analysis by P. Schevin). Counts and percentages.

Taxons identifiés	Nombre	%	Taxons identifiés	Nombre	%
<i>Acalypha</i> ou <i>Carapa</i> ?	2	0,06	Moraceae	305	9,90
Acanthaceae (Cf.)	1	0,03	<i>Myrica</i>	25	0,81
Alchornea	4	0,13	Myrsinaceae	9	0,29
<i>Alnus</i>	1 885	61,16	Myrtaceae	8	0,26
Anacardiaceae (Cf.)	4	0,13	<i>Ostrya</i> (Cf.)	1	0,03
Apiaceae	8	0,26	Papilionaceae (Cf.)	2	0,06
Araceae	3	0,10	Papilionaceae type <i>Indigofera</i>	1	0,03
Asteraceae Liguliflorae	124	4,02	<i>Pinus</i>	16	0,52
Asteraceae type <i>Flatowia</i>	6	0,19	<i>Plantago</i> (Cf.)	2	0,06
Asteraceae type <i>Ophryosporus</i>	1	0,03	<i>Platanus</i>	6	0,19
<i>Begonia</i> (Cf.)	3	0,10	Podocarpaceae	5	0,16
<i>Betula</i>	3	0,10	Polygonaceae type <i>Coccoloba</i>	18	0,58
Bignoniaceae (Cf.)	3	0,10	Renonculaceae (Cf.)	17	0,55
Burséraceae (Cf.)	3	0,10	Rhizophoraceae type <i>Carallia</i>	11	0,36
Calyceraceae (Cf.)	1	0,03	Rhizophoraceae type <i>Cassipourea</i>	5	0,16
Campanulaceae	1	0,03	Rhizophoraceae type <i>Rhizophora</i>	2	0,06
Cannabaceae (Cf.)	2	0,06	Rosaceae (Cf.)	3	0,10
Caryophyllaceae	3	0,10	<i>Salix</i>	6	0,19
<i>Castanea</i> (Cf.)	2	0,06	Sapindaceae (Cf.)	4	0,13
<i>Casuarina</i>	4	0,13	Sapotaceae (Cf.)	1	0,03
Caesalpinaceae	5	0,16	Saxifragaceae	2	0,06
Chenopodiaceae	10	0,32	Scophulariaceae type <i>Digitalis</i> (Cf.)	6	0,19
<i>Clethra</i>	3	0,10	Scrophularia (Cf.)	2	0,06
Convolvulaceae (Cf.)	2	0,06	Spores monolètes	4	0,13
<i>Coriaria</i> (Cf.)	9	0,29	Spores trilètes	6	0,19
Cyperaceae	21	0,68	<i>Tamarix</i> (Cf.)	1	0,03
Euphorbiaceae (Cf.)	2	0,06	Type 04	1	0,03
Euphorbiaceae type <i>Acalypha</i>	1	0,03	Type 08	3	0,10
Euphorbiaceae type <i>Avellanita</i>	3	0,10	Type 15	1	0,03
Euphorbiaceae type <i>Drypetes</i>	3	0,10	Type 19	2	0,06
Euphorbiaceae type <i>Phyllanthus</i>	1	0,03	Type 20	1	0,03
Euphorbiaceae type <i>Ricinus</i>	5	0,16	Type 29	1	0,03
Fabaceae	26	0,84	Type 30	1	0,03
Fabaceae type <i>Cassia</i>	10	0,32	Type 31	1	0,03
Graminae	65	2,11	Type 32	1	0,03
<i>Hedyosmum</i>	2	0,06	Type 33	1	0,03
<i>Heliotropium</i>	27	0,88	Type 34	1	0,03
Holoptelea	3	0,10	Type 35	2	0,06
Iridaceae type <i>Crocus</i> (Cf.)	1	0,03	Type 36	1	0,03
Juglans	1	0,03	Type 37	1	0,03
Lamiaceae	3	0,10	Ulmaceae type <i>Trema</i>	20	0,65
Lauraceae	1	0,03	<i>Ulmus</i>	7	0,23
<i>Lonicera</i>	1	0,03	Urticaceae	116	3,76
Malpighiaceae	2	0,06	Valerianaceae	10	0,32
Melastomataceae-Combretaceae	46	1,49	Abimés	46	1,49
Meliaceae	2	0,06	Indéterminés	9	0,29
<i>Mimosa scabrella</i>	70	2,27	Total	3 082	

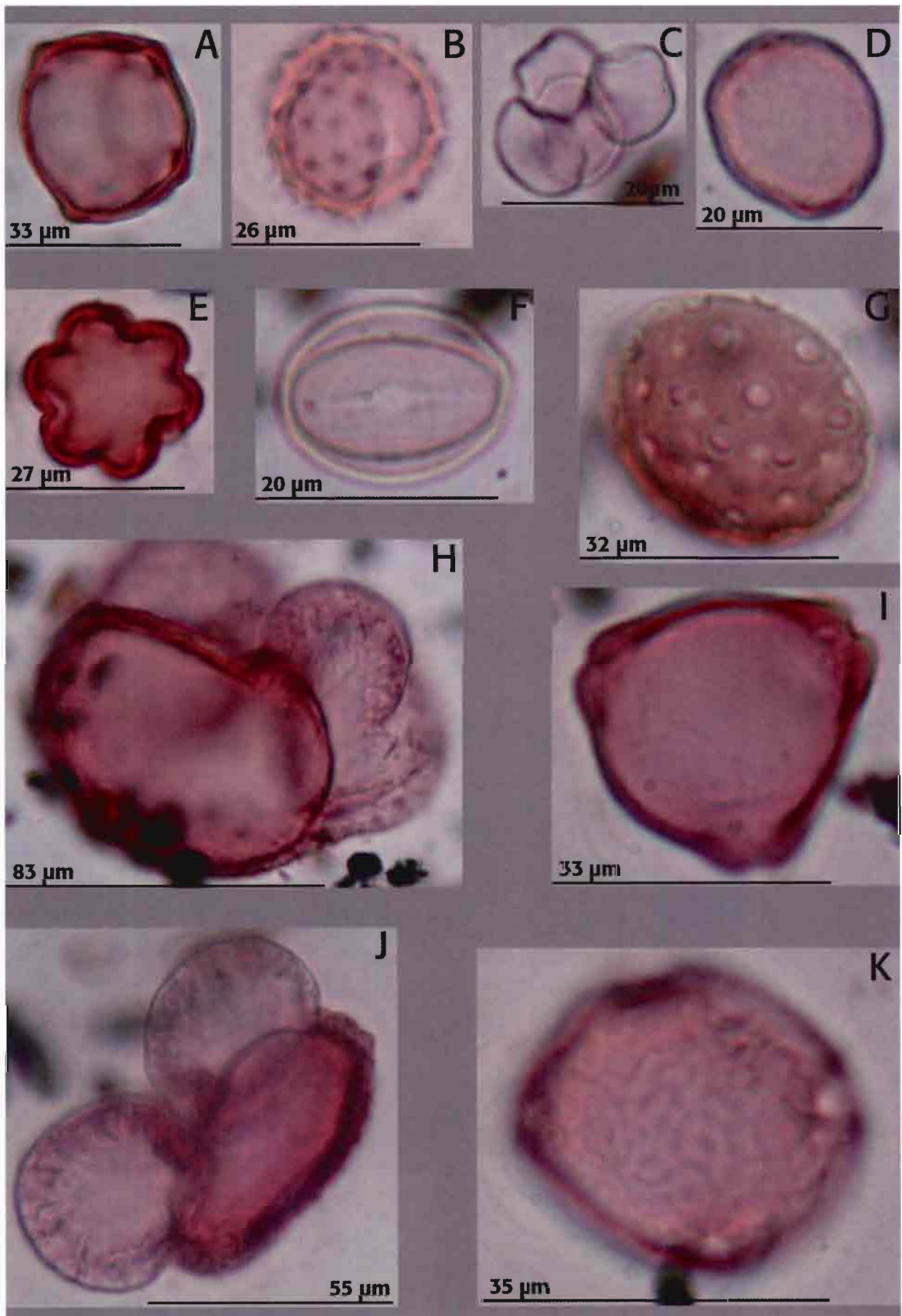


Figure 319: photos de grains piégés dans le filtre A4 exposé à Clipperton. **A:** *Alnus*, **B:** Asteraceae, **C:** *Mimosa*, **D:** Moraceae, **E:** *Heliotropium*, **F:** Melastomataceae, **G:** Chenopodiaceae, **H:** *Pinus*, **I:** *Myrica*, **J:** Podocarpaceae, **K:** Ulmaceae. (photos P. Schevin et J. Ferrier).

Photos of pollen grains collected in the A4 filter exposed at Clipperton. **A:** *Alnus*, **B:** Asteraceae, **C:** *Mimosa*, **D:** Moraceae, **E:** *Heliotropium*, **F:** Melastomataceae, **G:** Chenopodiaceae, **H:** *Pinus*, **I:** *Myrica*, **J:** Podocarpaceae, **K:** Ulmaceae. (photos P. Schevin and J. Ferrier).

s'est toujours déplacée à l'interface sol-atmosphère, mais qu'elle occupe cette position à la date et à l'heure considérées. Seules les masses d'air se déplaçant à des altitudes inférieures ou égales à 1 000 m

au-dessus de zones continentales ou d'archipels - sources potentielles de grains de pollen - et donc susceptibles de capturer, lors de leur passage, les grains mis en suspension, ont été prises en considération.

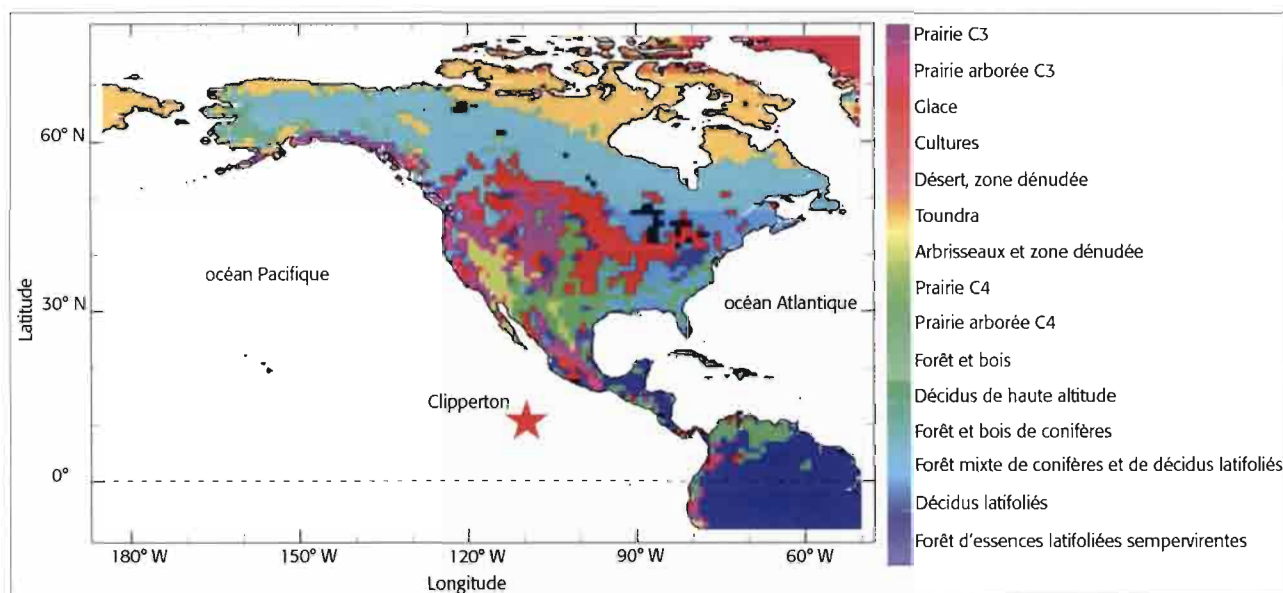


Figure 320 : distribution de classes de couverture végétale en Amérique du Nord et Amérique centrale à partir de données globale NASA utilisées pour les modèles atmosphère-continent, incluant un indice normalisé de différence de végétation et d'autres paramètres de végétation.

(<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NASA/.ISLSCP/.GDSLAM/.Vegetation/>).

Distribution of classes of vegetation cover in North America and Central America, from NASA global data used for atmosphere-continent models, including an index of normalized difference vegetation and other vegetation parameters.

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NASA/.ISLSCP/.GDSLAM/.Vegetation/>.

DISCUSSION

Le dénombrement obtenu pour le filtre exposé du 14 au 28 février 2005 s'avère particulièrement remarquable par la diversité des taxons identifiés, mais aussi le nombre de grains comptés. Bien que l'aulne représente la classe dominante, l'ensemble des essences reconnues correspond à la végétation présente sur les continents voisins nord, sud et centre-américains. Toutefois une comparaison peut d'ores et déjà être réalisée avec des enregistrements aéropalynologiques réalisés à bord d'un navire océanographique en mer des Antilles (trajet 1: T1) et le long de la côte occidentale de l'Amérique centrale (trajets 2 et 3: T2 et T3; Rousseau comm. pers) (Tab. LIII). En effet, des filtres similaires à ceux exposés à Clipperton l'ont été sur le *Maurice Ewing*, navire de l'Université Columbia à New York, en 1995. Le trajet de ce bateau consistait, depuis la Floride, à traverser la mer des Antilles, puis franchir le canal de Panama pour remonter en latitude le long de la côte occidentale d'Amérique centrale et du Nord jusqu'en Oregon. Les relevés des filtres exposés sur ce navire océanographique, bien que réalisés en mars et avril 1995, montrent que les taxons prédominants à Clipperton sont également bien représentés sur les filtres, à hauteur de 10,69%, 16,67% et 25,81%. Cette première

Tableau LIII : comparaison des proportions entre le filtre A4 exposé à Clipperton et les filtres exposés en 1995 sur le navire *Maurice Ewing* de l'Université Columbia (analyse D. Duzer non publiée). **T1** : trajet 1 (départ 14°35N 66°50W, arrivée 9°21N 79°59W); **T2** : trajet 2 (départ 9°53N 86°16W, arrivée 17°32,34N 102°07,39W); **T3** : trajet 3 (départ 17°28,432N 104°15,144W, arrivée 32°33,112N 117°13,563W)

Comparison of proportions between the A4 filter exposed at Clipperton and those exposed in 1995 on the *Maurice Ewing* ship of Columbia University (unpublished analysis by D. Duzer's). **T1** : course 1 (departure 14°35N 66°50W, arrival 9°21N 79°59W); **T2** : course 2 (departure 9°53N 86°16W, arrival 17°32.34N 102°07.39W); **T3** : course 3 (departure 17°28.432N 104°15.144W, arrival 32°33.112N 117°13.563W).

Taxons	Clipperton		T1		T2		T3	
	nb	%	nb	%	nb	%	nb	%
<i>Alnus</i>	1885	61,16	3	0,33	46	1,57	2	0,35
Asteraceae Liguliflorae	124	4,02	2	1,14	15	0,46	43	7,57
Melastomataceae -Combretaceae	46	1,49	50	2,59	34	1,05	5	1,15
<i>Mimosa</i>	70	2,27	51	2,65	26	0,80	2	0,35
Moraceae	305	9,9	8	0,88	269	8,28	14	3,23
Urticaceae	116	3,76	47	2,44	100	3,40	47	10,85
<i>Pinus</i>	16	0,52	6	0,66	35	1,08	10	2,31
Polygonaceae	18	0,58	0	0	1	0,03	0	0
Total (%)		83,7		10,69		16,67		25,81

indication, bien que relative, semble indiquer qu'il existe une corrélation entre l'enregistrement obtenu à Clipperton et les zones sources potentielles représentées par l'Amérique centrale et les Antilles.

Les rétrotrajectoires reconstituées à partir de Clipperton pour les différents jours de l'intervalle 14-28 février montrent qu'il existe un transport potentiel de pollen en provenance d'Amérique du Nord, du Sud ou centrale, confirmant ainsi la comparaison précédente. Toutefois, deux paramètres nous ont permis d'affiner la sélection des périodes les plus favorables au transport :

- l'altitude à laquelle est passée la masse d'air au-dessus de la zone continentale ;
- l'analyse des mouvements verticaux de l'atmosphère.

Pour l'altitude, nous avons retenu les altitudes inférieures ou égales à 1 000 m et avons rejeté les masses d'air ne se déplaçant qu'au "niveau du sol" en tenant compte des observations réalisées lors des études précédentes au Groenland et de considérations complémentaires sur le transport par Barry *et al.* (1981). Ces auteurs en effet considèrent que les transports sur de très longues distances nécessitent une mise en suspension vers des altitudes moyennes d'environ 1 000-1 500 m, les grains capturés à très faible altitude n'étant déplacés que sur des distances relativement courtes à l'échelle locale ou régionale. Les études de modélisation du transport du pollen de Helbig *et al.*

(2004) ont confirmé ces résultats soulignant, que le transport sur de très grandes distances - comme c'est le cas pour Clipperton - nécessitent des paramétrisations particulièrement complexes des modèles. D'autre part, les mouvements verticaux de l'atmosphère permettent aux grains de pollen d'être capturés par les masses d'air lorsqu'elles passent au-dessus des écosystèmes sources. En effet si, au moment du passage de la masse d'air, les mouvements verticaux sont descendants et associés à des précipitations, les grains émis ne seront pas susceptibles d'être capturés et donc transportés. Combinant ces paramètres, nous avons ainsi sélectionné les masses d'air responsables du transport des grains de pollen vers Clipperton durant l'intervalle d'exposition des filtres.

La masse d'air, qui est passée à 1 000 m au-dessus de Clipperton le 18 février, avait balayé le Nicaragua les 14 et 15 février à une altitude inférieure ou égale à 1 000 m (Fig. 321). L'examen de la vitesse de l'atmosphère indique qu'un mouvement ascendant de l'air en fin de matinée du 14 février a permis au pollen d'être capturé par ladite masse d'air. Puis, le 18 février, des mouvements descendants de l'atmosphère ont permis aux grains de pollen de sédimenter sur le filtre.

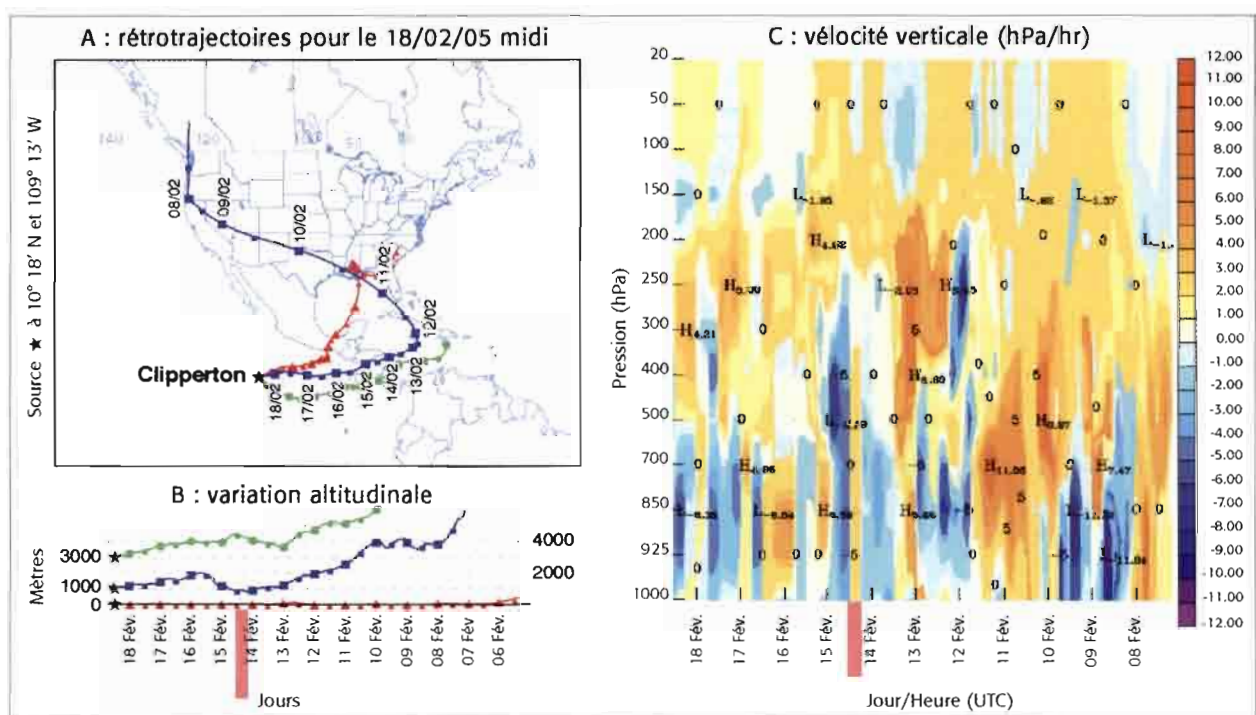


Figure 321 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 18 février 2005 depuis Clipperton.

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1 000 m au-dessus des filtres, à 3 000 m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton à 1 000 m le 18 février est passée au-dessus du Nicaragua les 14 et 15 février à une altitude inférieure ou égale à 1 000 m.

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 1 000 m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air en fin de matinée du 14 février (boîte rouge) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air. Par contre le 18 février des mouvements descendants de l'atmosphère ont permis aux grains de sédimenter sur le filtre.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model from 18 February 2005 from Clipperton.

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1 000 m above the filters, 3 000 m above the filters). The air mass passing over Clipperton at 1 000 m on 18 February passed over Nicaragua on 14 and 15 February at an altitude of 1 000 m or less.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected atmospheric air masses, here 1 000 m. Examination of the values indicates that upward movement of air in the late morning of 14 February (red box) allowed pollen to be captured by the said air mass. By February 18, on the contrary, the downward movement of the atmosphere allowed the grains to settle on the filter.

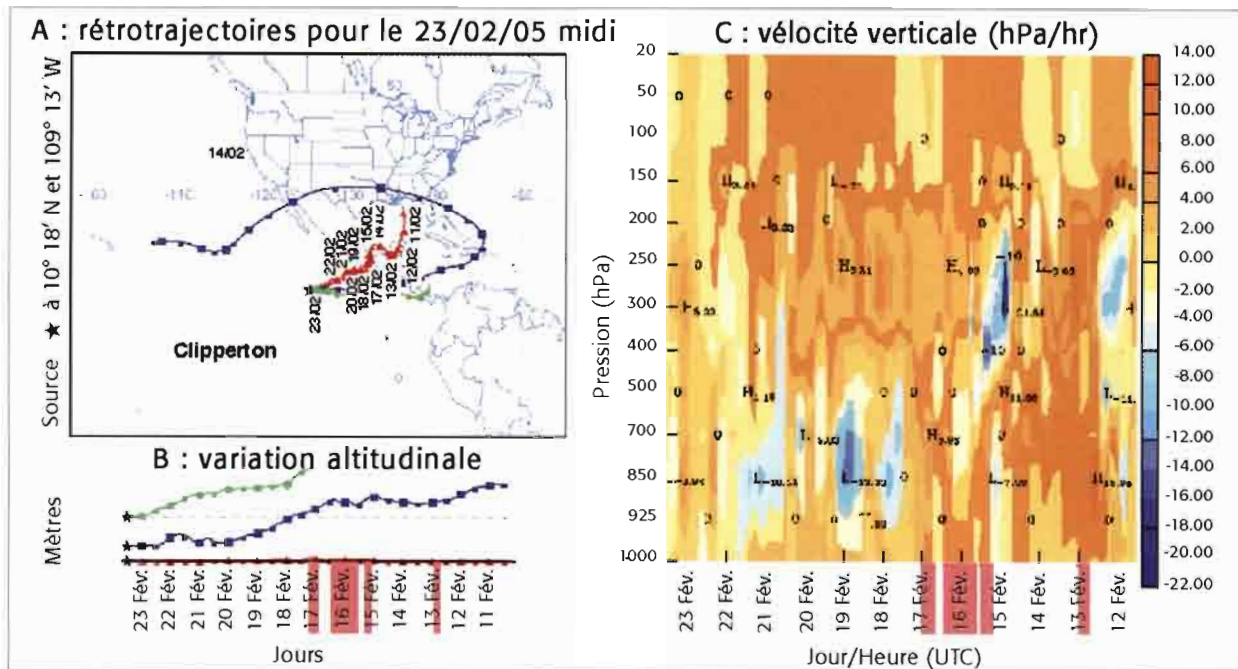


Figure 322 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 23 Février depuis Clipperton (0m)

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, 1 000m au-dessus des filtres, 3 000m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 23 février à hauteur des filtres est passée au-dessus du Mexique entre les 13 et 17 février à une altitude inférieure à 500m

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 0m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air du début du 13 février au 17 février en fin d'après-midi (boîtes rouges) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air.

Backward trajectories calculated from HYSPLIT model from 23 February from Clipperton (0m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1 000m, above the filters, 3 000m above the filters). The air mass passing over Clipperton on February 23 at the filter level passed over Mexico between February 13 and 17 at an altitude below 500m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected atmospheric air masses, here 0m. Examination of the values indicates that upward movement of air from the early morning of 13 February to late afternoon of 17 February (red boxes) allowed pollen to be captured by the said air mass.

De même, la masse d'air qui a survolé Clipperton le 19 février à 3 000 m d'altitude s'était déplacée au-dessus des Petites Antilles entre les 8 et 10 février à une altitude inférieure ou égale à 1 000 m. La carte de la vitesse de l'atmosphère indique un mouvement ascendant dans les Petites Antilles, du début du 8 février au 9 février en fin d'après-midi, permettant au pollen d'être capturé. Puis, le 19 février, des mouvements descendants de l'atmosphère ont permis aux grains de sédimenter sur le filtre.

Enfin, HYSPLIT fournit des résultats intéressants pour les 23, 25 et 26 février, puisqu'ils semblent invoquer un fonctionnement différent des deux cas précédents. Ainsi, les masses d'air qui ont survolé Clipperton les 23, 25 et 26 février (Fig. 322, 323, 324) avaient préalablement balayé le Mexique à une altitude d'environ 150 m en moyenne, et étaient accompagnées de mouvements ascendants. Nous déduisons de ces observations que les grains déposés à Clipperton les 23 février provenaient des forêts du Mexique. Un cas similaire de transport, via une masse d'air se déplaçant entre 0 et 500 m dans le domaine arctique, nous avait permis d'expliquer la présence de grains de pollen d'arbres endémiques à l'Amérique du Nord sur nos filtres du Groenland (Rousseau *et al.* 2006).

Le 28 février, le filtre a dû être changé entre 8 et 9h, ce qui nous permet d'observer le dépôt des grains en tout début de matinée. HYSPLIT montre, qu'à

cette date, trois masses d'air se déplaçant à des altitudes différentes semblent avoir contribué au transport et au dépôt des grains de pollen. L'une d'entre elles a survolé Clipperton le 28 février à midi à 3 000 m d'altitude (Fig. 325), après avoir circulé au-dessus de Panama le 21 février à une altitude inférieure à 1 000 m. Une autre, qui s'est déplacée au-dessus de Clipperton à 1 000 m d'altitude (Fig. 326), avait balayé le Mexique à une altitude inférieure à 1 000 m entre le 19 après-midi et le 22 février. La troisième, qui a balayé les filtres, avait circulé entre le 23 février après-midi et le 25 février au-dessus de la Basse Californie au Mexique, à une altitude d'environ 150 m (Fig. 327). D'autre part, en ce qui concerne la vitesse atmosphérique pour ces trois masses d'air, l'examen des cartes montre un mouvement ascendant de l'air dans chacun des cas. Il intervient le 21 en fin d'après-midi au-dessus de Panama pour la masse d'air circulant à 3 000 m d'altitude, le 20 après-midi d'une part et le 21 février de 6 à 12 h et de 18 à 24 h pour la masse d'air circulant à 1 000 m d'altitude sur le Mexique. Enfin un mouvement ascendant est indiqué, du 23 après-midi au 25 février en Basse Californie, pour la masse d'air arrivant au niveau des filtres. Puis des mouvements descendants de l'atmosphère, qui se sont produits le 28 février en début de matinée jusqu'à 8 h, associés à une légère pluie, ont permis aux grains de sédimenter sur le filtre.

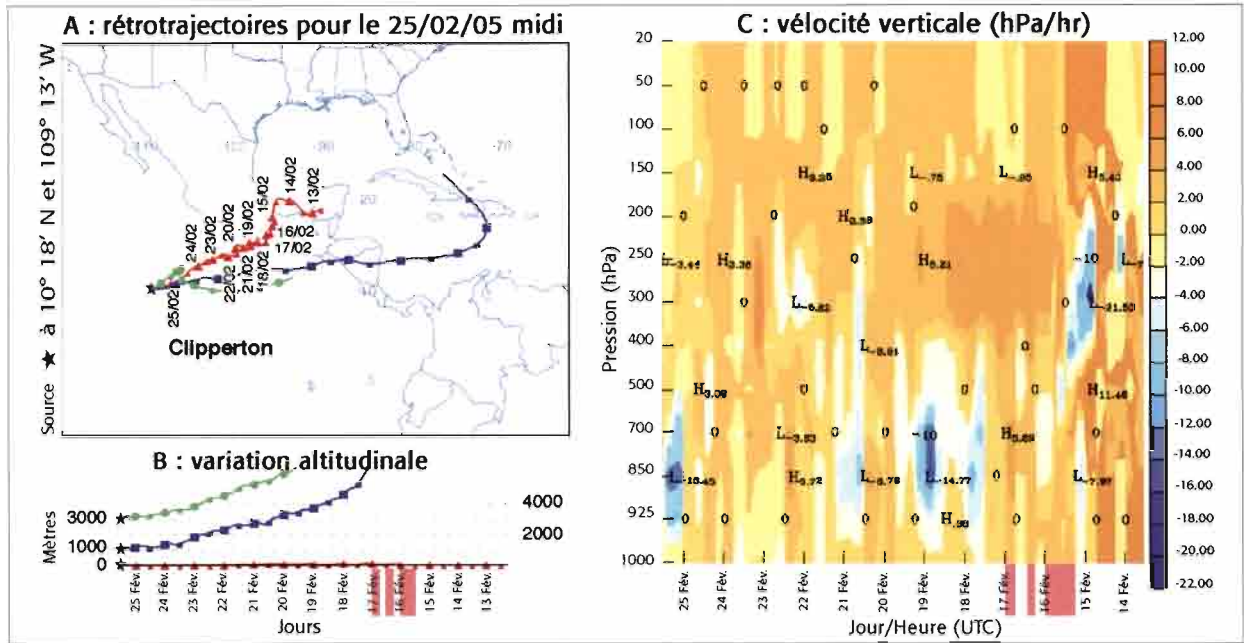


Figure 323 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 25 Février depuis Clipperton (0m).

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1000m au-dessus des filtres, à 3000m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 25 février à hauteur des filtres est passée au-dessus du Mexique entre les 15 et 17 février à une altitude inférieure à 500m

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 0m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air du début du 15 février au 17 février en fin d'après-midi (boîtes rouges) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model from 25 in February from Clipperton (0m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1000m above the filters, 3000m above the filters). The air mass passing over Clipperton on February 25 at the filter level passed over Mexico between February 15 and 17 at an altitude below 500m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected atmospheric air masses, here 0m. Examination of the values indicates that upward movement of air from the early morning of 15 February to late afternoon of 17 February (red boxes) allowed pollen to be captured by the said air mass.

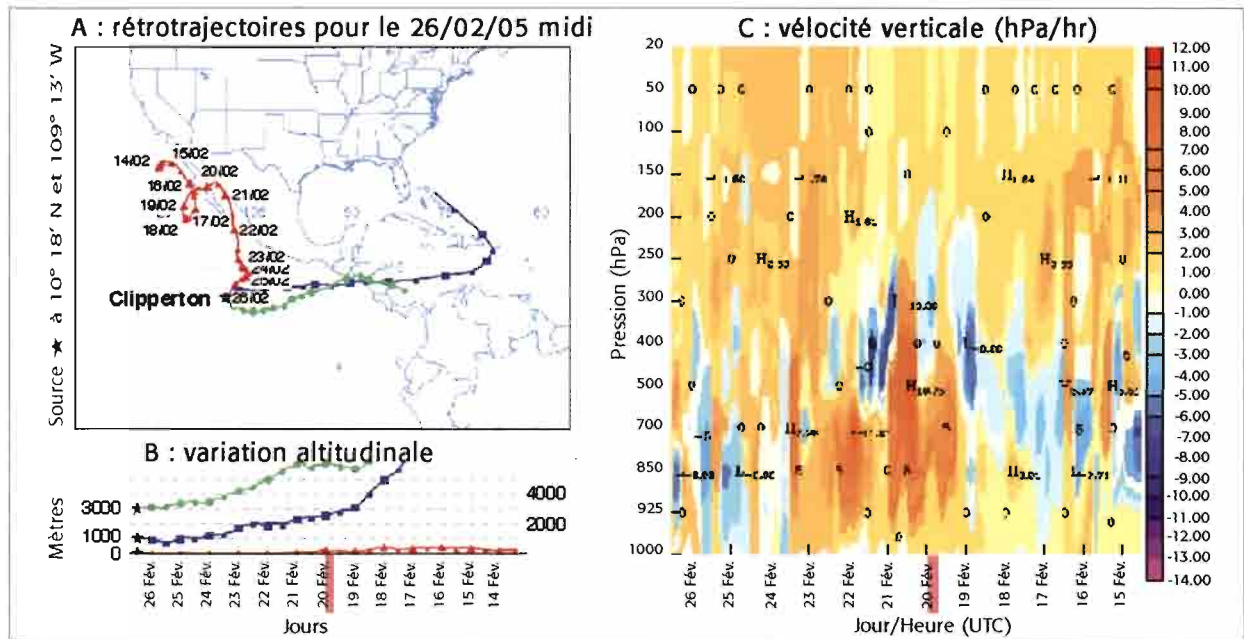


Figure 324 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 26 Février depuis Clipperton (0m).

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1000m au-dessus des filtres, à 3000m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 26 février à hauteur des filtres est passée au-dessus du Mexique, Basse Californie, entre les 19 et 20 février à une altitude inférieure à 500m.

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 0m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air en fin de journée du 19 (boîte rouge) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model from 26 in February from Clipperton (0m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1000m above the filters, 3000m above the filters). The mass of air passing over Clipperton on February 26 at the filter level passed over Mexico, Baja California, between February 19 and 20 at an altitude below 500m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected atmospheric air masses, here 0m. Examination of the values indicates that upward movement of air at the end of the 19th (red box) allowed pollen to be captured by the said air mass.

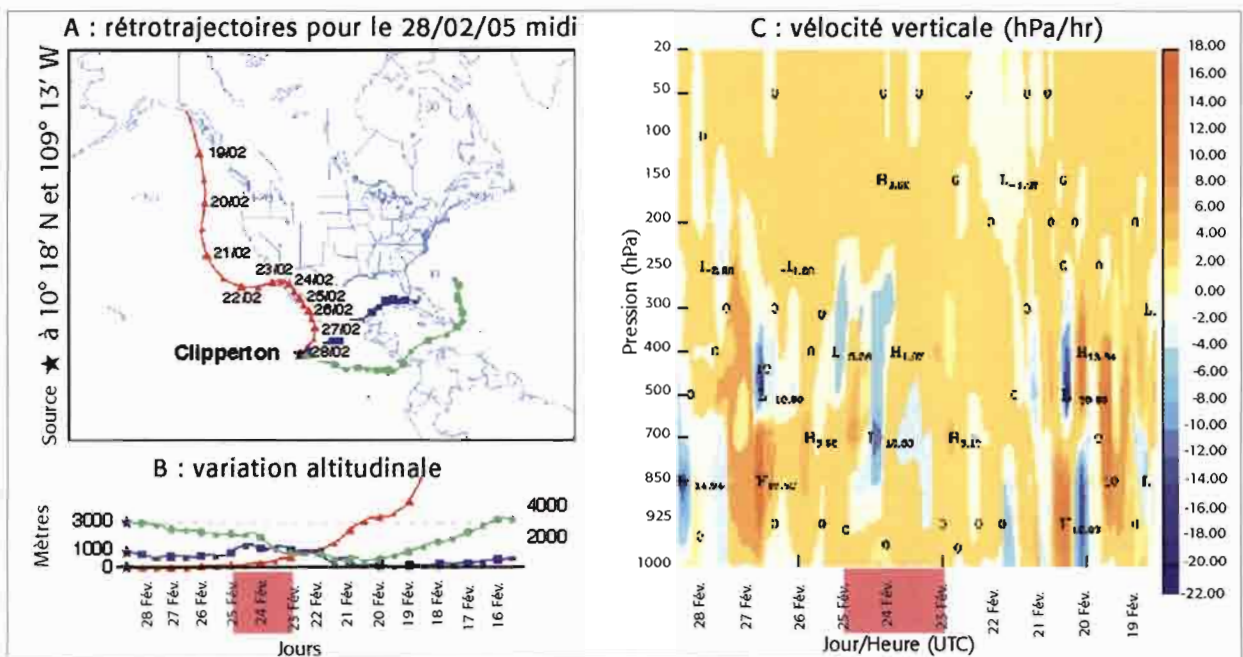
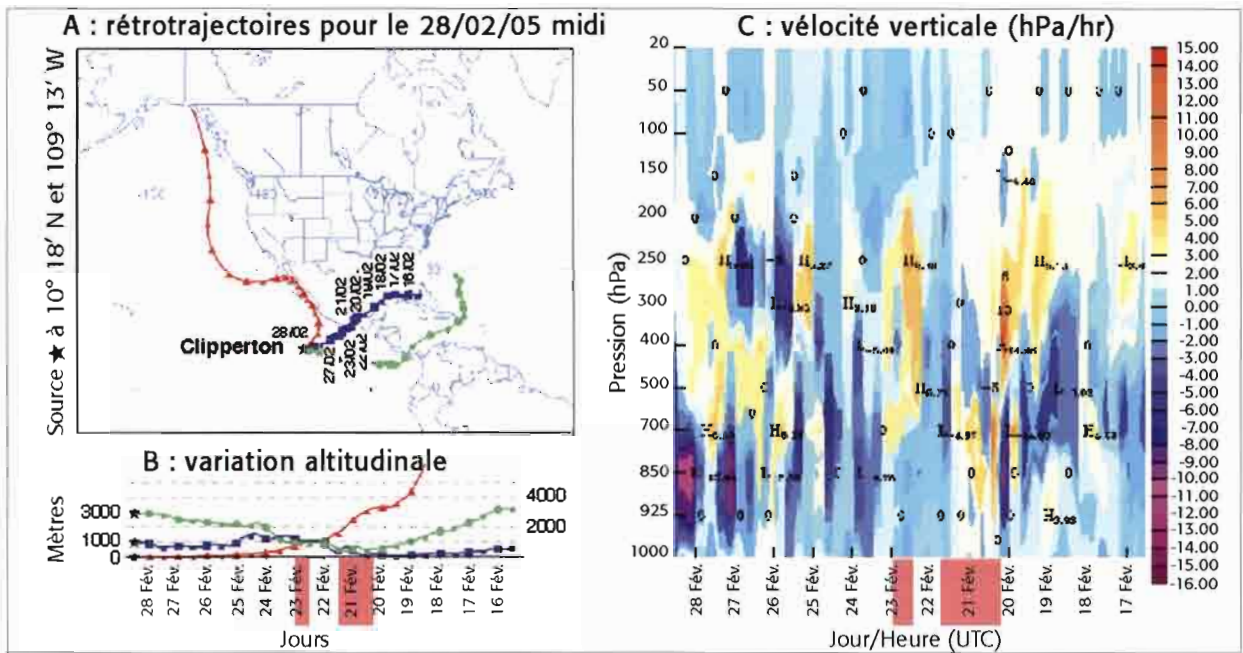
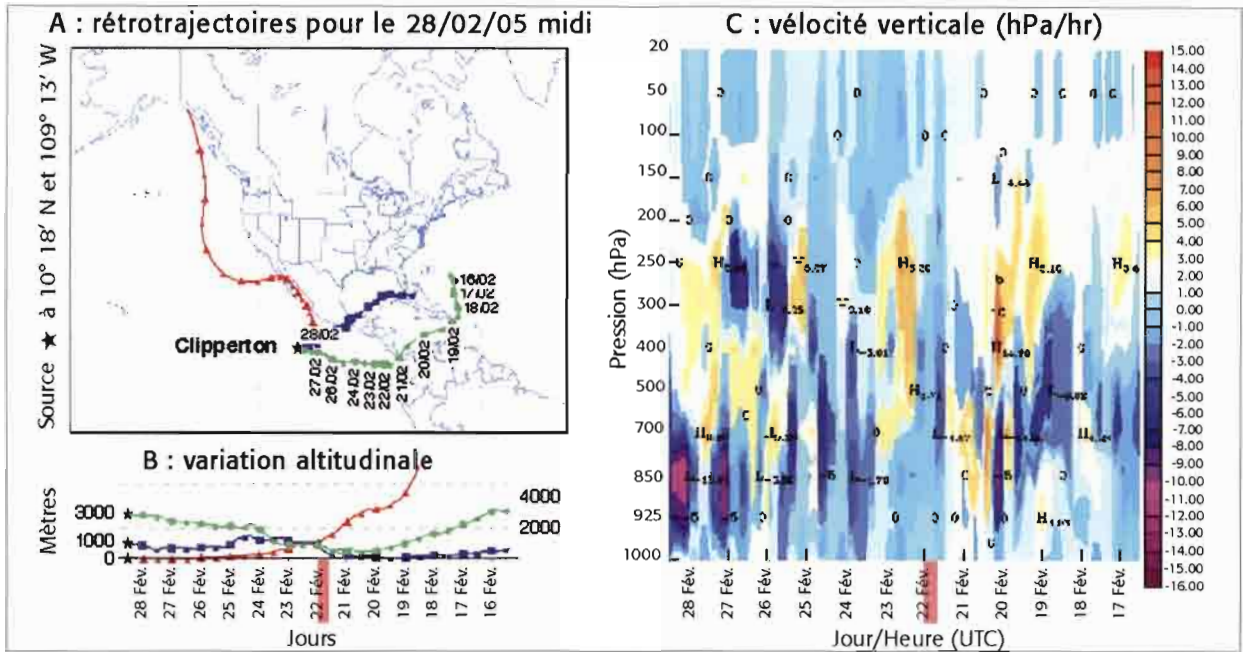


Figure 325 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 28 Février depuis Clipperton (3 000 m).

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1 000 m au-dessus des filtres, à 3 000 m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 28 février à 3 000 m est passée au-dessus du Mexique dans l'après midi du 21 février à une altitude inférieure à 1 000 m.

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 3 000 m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air en fin d'après-midi du 21 février (boîte rouge) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air. Par contre le 28 février des mouvements descendants de l'atmosphère ont permis aux grains de sédimenter sur le filtre.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model starting February 28 from Clipperton (3 000 m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1 000 m above the filters, 3 000 m above the filters). The mass of air passing over Clipperton on February 28 at 3 000 m passed over Mexico during the afternoon of February 21 at an altitude below 1 000 m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected atmospheric air masses, here 3 000 m. Examination of the values indicates that upward movement of air in the late afternoon of 21 February (red box) allowed pollen to be captured by the said air mass. On the contrary, on February 28 the downward movement of the atmosphere allowed the deposition of grains on the filter.

Figure 326 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 28 Février depuis Clipperton (1 000 m).

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1 000 m au-dessus des filtres, à 3 000 m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 28 février à 1 000 m est passée au-dessus du Mexique dans l'après midi du 20 au 23 février à une altitude inférieure à 1 000 m.

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 1 000 m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air en fin de matinée du 20 février jusqu'à la fin de journée du 23 février (boîte rouge) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air. Par contre le 28 février des mouvements descendants de l'atmosphère ont permis aux grains de sédimenter sur le filtre.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model from February 28 from Clipperton (1 000 m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1 000 m above the filters, 3 000 m above the filters). The mass of air passing over Clipperton on February 28 at 1 000 m passed over Mexico during the afternoon of February 20 to 23 at an altitude below 1 000 m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for selected atmospheric air masses, here 1 000 m. Examination of the values indicates that upward movement of air in the late morning of 20 February until the end of the day of 23 February (red boxes) allowed pollen to be captured by the said air mass. On the contrary, on February 28 the downward movement of the atmosphere allowed the grains to settle on the filter.

Figure 327 : rétrotrajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT à partir du 28 Février depuis Clipperton (0 m).

A : carte indiquant les trajets de masses d'air calculés pour différentes altitudes (à hauteur des filtres, à 1 000 m au-dessus des filtres, à 3 000 m au-dessus des filtres). La masse d'air passant au-dessus de Clipperton le 25 février à hauteur des filtres est passée au-dessus du Mexique, Basse Californie, entre les 23 et 25 février à une altitude inférieure à 500 m.

B : variations altitudinales des trois types de masses d'air le long des rétrotrajectoires.

C : variation de la vitesse atmosphérique pour les masses d'air retenues, ici 0 m. L'examen des valeurs indique qu'un mouvement ascendant de l'air du début du 23 février au 25 février en fin d'après-midi (boîtes rouges) a permis au pollen d'être capturé par la dite masse d'air.

Backward trajectories computed from HYSPLIT model from February 28 from Clipperton (0 m).

A : map showing the routes of air masses computed for various altitudes (at height of filters, 1 000 m above the filters, 3 000 m above the filters). The mass of air passing over Clipperton on February 25 at the filter height passed over Baja California, Mexico, between 23 and 25 February at an altitude below 500 m.

B : altitudinal variations of the three types of air masses along the backward trajectories.

C : change in velocity for the selected air masses, here 0 m. Examination of the values indicates that upward movement of air from the early morning of 23 February to the late afternoon of 25 February (red box) allowed pollen to be captured by the said air mass.

Les différentes rétrotrajectoires, permettant d'interpréter le transport longue distance survenu vers Clipperton entre le 14 et le 28 février, bien qu'indicatives, s'avèrent en accord avec les données obtenues sur les filtres exposés en 1995 sur le navire océanographique US. En effet, les données du trajet 1

révèlent des similitudes avec des observations régulières à terre dans les Antilles (données Cour non publiées), et celles obtenues durant les trajets 2 et 3 correspondent à des missions océanographiques effectuées le long de la côte occidentale d'Amérique centrale, Mexique inclus.

CONCLUSION

Bien que préliminaire, l'étude du filtre le plus chargé en pollen exposé à Clipperton révèle un important transport de pollen sur de très longues distances vers l'atoll en provenance d'Amérique centrale. Ce transport a bénéficié en outre de la position privilégiée de l'atoll vis-à-vis de la trajectoire des alizés dans cette région. Bien que logique, il fallait avoir la possibilité de tester cette évidence, ce que cette mission a rendu possible. Ces résultats viennent compléter ceux obtenus sous différentes latitudes, notamment dans l'hémisphère nord,

indiquant que le transport du pollen survient à différentes échelles et n'est pas un phénomène exceptionnel. En effet si l'on se réfère au décompte en grains, mais aussi à la diversité taxonomique identifiée, obtenus pour Clipperton, ceux-ci semblent être transportés sur de très longues distances sous différentes latitudes à condition que des conditions de transport soient synchronisées avec leur émission dans l'atmosphère et que les conditions environnementales et de transport en permettent la préservation.



REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'aimable proposition de J.-L. Étienne, dans la suite de

notre collaboration lors de l'expédition Banquise 2002.

- BARRY R.-G., ELLIOTT D.-L. & CRANE R.-G. 1981. – The palaeoclimatic interpretation of exotic pollen peaks in Holocene records from the eastern Canadian Arctic: a discussion. *Review of Palaeobotany and Palynology* 33 : 153-167.
- BIRKS H.-J.-B. & BIRKS H.-H. 1980. – *Quaternary Palaeoecology*. Arnold ed., London, 289 p.
- BOURGEOIS J.-C. 2000. – Seasonal and interannual pollen variability in snow layers of arctic ice caps. *Review of Palaeobotany and Palynology* 108(1-2) : 17-36.
- BOURGEOIS J.-C., GAJEWSKI K. & KOERNER R.-M. 2001. – Spatial patterns of pollen deposition in arctic snow. *Journal of Geophysical Research* 106(D6) : 5255-5265.
- BOURGEOIS J.-C., KOERNER R.-M. & ALT J.-C. 1985. – Airborne pollen: A unique air mass tracer, its influx to the Canadian high Arctic. *Annals of Glaciology* 7 : 109-116.
- CAMBON G. 1994. – Modern pollen spectra and vegetation in southern Ontario, Canada. *Review of Palaeobotany and Palynology* 82 : 147-155.
- CAMBON G., RITCHIE J.-C. & GUINET P. 1992. – Pollen marqueur de transports à longue distance dans l'atmosphère du sud de l'Ontario (Canada). *Canadian Journal of Botany* 70 : 2284-2293.
- CAMPBELL I.-D., MCDONALD K., FLANNIGAN M. & KRINGAYARK J. 1999. – Long-distance transport of pollen into the Arctic. *Nature* 399 : 29-30.
- COUR P. 1974. – Nouvelles techniques de détection des flux et des retombées polliniques : étude de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollen et Spores* 16(1) : 103-141.
- COUR P., CAMBON G., FERRIER J., DUZER D., JANZON L., QUET L., LOUBLIER Y., OLIVIER J. & GROS R. 1993. – Calendriers polliniques de l'Europe occidentale, région méditerranéenne comprise, in GUÉRIN B., NOLARD N., PELTRE G. & SELL Y. (Eds), *Pollen et allergies*. Allerbio, Varennes-en-Argonne : 255-270.
- DRAXLER R.-R. & HESS G.-D. 1998. – An overview of the Hysplit_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine* 47 : 295-308.
- FAEGRI K. & IVERSEN J. 1989. – *Textbook of Pollen Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, 328 p.
- HJELMROOS M. & FRANZEN L.-G. 1994. – Implications of recent long-distance pollen transport events for the interpretation of fossil pollen records in Fennoscandia. *Review of Palaeobotany and Palynology* 82(1-2) : 175-189.
- HYSPLIT4Model 1997. – (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. (consulté en janvier 2006).
- JACOBS J.-D., MODE W.-N. & DOWDESWELL E.-K. 1985. – Contemporary pollen deposition and the distribution of *Betula glandulosa* at the limit of low arctic tundra in Southern Baffin Island, Nwt, Canada. *Arctic and Alpine Research* 17(3) : 279-287.
- JANSSEN C.-R. 1973. – Local and regional pollen deposition, in BIRKS J.-H.-B. & WEST R.-G. (Eds), *Quaternary plant Ecology*. Blackwell Scientific, Oxford : 30-43.
- LEROUX M. 1996. – La dynamique du temps et du climat. Masson, Paris, 310 p.
- NICHOLS H. 1967. – Pollen diagrams from Sub-Arctic Central Canada. *Science* 155(3770) : 1665-1668.
- RITCHIE J.-C. 1974. – Modern pollen assemblages near arctic tree line, Mackenzie Delta Region, Northwest-Territories. *Canadian Journal of Botany* 52(2) : 381-396.
- RITCHIE J.-C. & LICHTI-FEDEROVICH S. 1967. – Pollen dispersal phenomena in Arctic-Subarctic Canada. *Review of Palaeobotany and Palynology* 3 : 255-266.
- ROUSSEAU D.-D., DUZER D., CAMBON G., JOLLY D., POULZEN U., FERRIER J., SCHEVIN P. & GROS R. 2003. – Long distance transport of pollen to Greenland. *Geophysical Research Letters* 30(14) : 1766, doi: 10.1029/2003GL017539.
- ROUSSEAU D.-D., DUZER D., ÉTIENNE J.-L., CAMBON G., JOLLY D., FERRIER J. & SCHEVIN P. 2004. – Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109(D6) doi:10.1029/2003JD003985.
- ROUSSEAU D.-D., SCHEVIN P., DUZER D., CAMBON G., FERRIER J., JOLLY D. & POULSEN U. 2006. – New evidence of long distance pollen transport to southern Greenland in late Spring. *Review of Palaeobotany and Palynology* 141 : 277-286.
- SHORT S.-K. & HOLDSWORTH G. 1985. – Pollen, oxygen isotope content and seasonality in an ice core from the Penny ice cap, Baffin Island. *Arctic* 38(3) : 214-218.
- WENG C., HOOGHIEMSTRA H. & DYUIVENWOORDEN J.-F. 2006. – Challenges in estimating past plant diversity from fossil pollen data: Statistical assessment, problems, and possible solutions. *Diversity & Distributions* 12 : 310-318.

Rousseau D.D., Schevin P., Ferrier J., Ledru Marie-Pierre,
Duzer D. (2009).

Existe-t-il un transport pollinique vers Clipperton ?

In : Charpy Loïc (coord.). Clipperton : environnement et
biodiversité d'un microcosme océanique.

Marseille (FRA) ; Paris : MNHN ; IRD, (68), 297-308.

(Patrimoines Naturels ; 68). ISBN 978-2-7099-1660-8