

UNE RECONSTITUTION SEMI-QUANTITATIVE DES CLIMATS DU PLÉISTOCÈNE SUPÉRIEUR À PARTIR DES DIAGRAMMES POLLINIQUES. COMPARAISON AVEC LES DONNÉES OCÉANIQUES ET GLACIAIRES.

A SEMI-QUANTITATIVE RECONSTRUCTION OF THE CLIMATES OF THE UPPER PLEISTOCENE FROM THE POLLEN DIAGRAMS. COMPARISON WITH THE ISOPOTIC PROFILES FROM SEA- AND ICE-CORES.

par Bruno BOSSELIN*

Mots Clés : Tourbières, Palynologie, Pléistocène supérieur, Analyse multivariée, Végétation, Paléoclimats, Profils isotopiques.

Key Words : Peat bogs, Palynology, Upper Pleistocene, Multivariate analysis, Vegetation, Palaeoclimates, Isotopic profiles.

RESUME

Le traitement multivarié des longues séquences polliniques de tourbières constitue une méthode de régression factorielle simple et efficace pour la reconstitution semi-quantitative des paléoclimats. La comparaison des résultats obtenus pour le Pléistocène supérieur avec les profils isotopiques issus de carottes océaniques et glaciaires, puis avec les constructions antérieures, confirme une structuration du dernier cycle climatique en quatre phases : l'interglaciaire Riss/Würm englobant l'optimum Eemien, le pléniglaciaire inférieur, l'interpléniglaciaire würmien et le pléniglaciaire supérieur, avant l'Holocène. Un système de numérotation de ces oscillations, corrélées avec les événements de Dansgaard-Oeschger reconnus dans les carottes glaciaires du Groenland, est proposé. Enfin, un dernier traitement statistique montre une évolution cyclique de la végétation forestière au cours de l'Eemien, évolution qui traduit plus fidèlement les variations des paléoclimats (température et humidité) que le simple taux de pollens d'arbres (AP).

ABSTRACT

The multivariate treatment of long pollen sequences coming from peat bogs constitutes an easy and effective method of factorial regression for the semi-quantitative reconstruction of the palaeoclimates. The comparison of the results obtained for the upper Pleistocene with the isotopic profiles of sea- and ice-cores, then with the previous methods, confirms a structuration of the last climatic cycle in four periods : the interglacial Riss/Würm including the optimum Eemian, the lower pleniglacial, the wurmian interpleniglacial and the upper pleniglacial, before the Holocene. A numbering system of these oscillations, correlated with the Dansgaard-Oeschger events recognized in the ice-cores of Greenland, is proposed. Finally, a last statistical treatment shows a cyclic evolution of the forest vegetation during the Eemian, evolution which better translate the variations of the palaeoclimates (temperature and humidity) than the arboreal pollen rate (AP).

I. INTRODUCTION

En 1955, C. Emiliani publie des courbes montrant les variations isotopiques de l'oxygène contenu dans des coquilles de foraminifères provenant de carottes océaniques, (Emiliani, 1955). Il en déduit, suivant une théorie développée par H.C. Urey (Urey, 1947), les fluctuations de la température de surface de l'eau de mer et propose une numérotation des stades isotopiques pour l'ensemble du quaternaire. Les travaux réalisés ultérieurement par N. Shackleton, N.D. Opdyke et J. Van Donk montrent que le rapport $\delta^{18}\text{O}$ permet en fait d'obtenir, non pas la température des eaux de surface, mais le volume des glaces continentales, et par déduction les variations du niveau des mers, rendant alors possible le calcul de vraies courbes de paléotempérature sur une séquence chronologique

* Bruno BOSSELIN - 134 rue Gambetta - F-92150 SURESNES - e-mail : bruno.bosselin@wanadoo.fr

étendue, (Shackleton, 1967, 1987 ; Shackleton et Opdyke, 1973, 1976 ; Shackleton et al., 1983 ; Van Donk, 1976). Les recherches les plus récentes mettent finalement en évidence un mécanisme de fractionnement isotopique de l'oxygène un peu plus complexe, (Dahl-Jensen et al., 1998 ; Hoffmann et al., sous presse ; Krinner et al., 1997 ; Petit et al., 1999 ; Salamatín et al., 1998).

Les sondages réalisés dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique ont abouti, ces dernières années, à des reconstitutions extrêmement précises des paléoclimats. Essentiellement basées sur les fluctuations du rapport $\delta^{18}\text{O}$ dans les carottes de Summit (GRIP et GISP2), Camp Century et Renland au Groenland (Dansgaard et al., 1993 ; Grootes et al., 1993 ; Johnsen et al., 1992, 1995, 1997⁽¹⁾), ces analyses sont efficacement complétées par l'étude des variations des teneurs en Deutérium, en dioxyde de carbone, en méthane, en sodium et en poussières dans le sondage de Vostok en Antarctique, (Barnola et al., 1987 ; Basile et al., 1997 ; Chappellaz et al., 1990, 1993 ; Jouzel et Lorius, 1993 ; Petit et al., 1990, 1999 ; Sowers et al., 1993). Les synthèses les plus récentes montrent une excellente corrélation entre les profils du Groenland, de l'Antarctique et les données océaniques (Bender et al., 1994 ; Bond et al., 1993 ; Pujol et Turon, 1986 ; Steig et al., 1998 ; Waelbroeck et al., 1995) et permettent de reconnaître, à l'intérieur de la séquence würmienne de GRIP-Summit, plusieurs oscillations tempérées, appelées événements de Dansgaard-Oeschger, numérotées de 1 à 24, et corrélées avec les principaux stratotypes continentaux⁽²⁾, (Dansgaard et al., 1993 ; Weißmüller, 1997).

Il faut attendre le début des années 1970 pour voir l'éclosion de la paléoclimatologie quantitative, basée sur trois types de méthodes : les régressions factorielles (Imbrie et Kipp, 1971), l'analyse spectrale de longues séquences stratigraphiques (Berger et Loutre, 1992 ; Berger et al., 1983, 1984, 1992 ; Govaerts et al., 1986 ; Hays et al., 1976 ; Pisias et al., 1973) et les techniques des séries chronologiques de G.E.P. Box et J.M. Jenkins, (Blasing, 1978 ; Box et Jenkins, 1970 ; Harrel et Briskin, 1980 ; Mc Kenna et al., 1988). Ces études ont permis de vérifier la théorie astronomique de la périodicité des climats avancée par M. Milankovitch (Hays et al., 1976 ; Imbrie et al., 1984 ; Milankovitch, 1938) et de confirmer que la stratigraphie isotopique, proposée initialement par C. Emiliani, était indépendante de la localisation géographique, débouchant sur la construction d'une courbe standard nommée « SPECMAP », (Emiliani, 1955 ; Imbrie, 1992 ; Martinson et al., 1987 ; Mörner, 1992 ; Pisias et al., 1984 ; Williams et al., 1988).

Dans le domaine de la palynologie, les premières approches quantitatives font appel à la notion de « fonction de transfert », (Sachs et al., 1977 ; Webb et Bryson, 1972). Depuis 15 ans, on assiste au développement de méthodes par interpolation basées sur le calcul d'indices de similarité, toutefois variables suivant les auteurs, (Bartlein et Prentice, 1986 ; Guiot et al., 1987 ; Prentice et al., 1992, 1996). Constatant les faiblesses et les limites des reconstructions antérieures (postulats de base discutables⁽³⁾ - difficulté de retrouver, dans les flores actuelles, l'équivalent des cortèges fossiles - inertie du couvert végétal vis à vis des changements climatiques - calibration des modélisations par extrapolation nécessaire mais délicate - ...), J. Guiot a proposé plusieurs méthodes de reconstitution quantitative des paléoclimats, à partir du traitement statistique, parfois complexe, de longues

⁽¹⁾ Une bibliographie exhaustive concernant le projet « Greenland Ice Core Project », et contenant plus de 250 références, est disponible à l'adresse internet <http://medias.meteo.fr/paleo/icecore/summit/tablecon.htm>. Dans le souci de ne pas alourdir inutilement notre discours, seuls quelques articles de synthèses ont été cités ici.

⁽²⁾ 1 : Allerød-Bølling, 2 : Laugerie, 3-4 : Tursac, 5 : Maisières, 6-7 : Denekamp (Arcy), 8 : Les Cottés, 12 : Hengelo, 14 : Glinde, 16 : Oerel, 21 : Odderade, 23 : Brørup, d'après les corrélations proposées par W. Dansgaard et al. et W. Weißmüller, (Dansgaard et al., 1993 ; Weißmüller, 1997).

⁽³⁾ a/ Le climat est seul responsable des fluctuations de la végétation - b/ Pas de variations écologiques des espèces dans le temps - c/ Observations sur les flores actuelles suffisantes pour reconstituer les paléoclimats - d/ Taux de CO₂ constant dans le temps.

séquences polliniques de tourbières. Cela lui a permis de modéliser, à l'échelle du mois, les écarts par rapport à l'actuel de la température et des précipitations pour le dernier cycle climatique à la Grande Pile et aux Echets, (Guiot, 1990 ; Guiot et al., 1989, 1992, 1993, 1999, 2000 ; Peyron et al., 1998 ; Pons et al., 1992). Une analyse comparative de ces résultats avec ceux obtenus par nous-mêmes sera entreprise dans la suite de cet exposé (cf. infra).

D'autres marqueurs de l'environnement ont été également utilisés pour une modélisation quantitative des paléoclimats : les foraminifères, les oiseaux, les mollusques, les micromammifères, les diatomées, les dinoflagellés, la dendrochronologie, les insectes, ... Une discussion plus complète, accompagnée d'une bibliographie exhaustive sur ces sujets, est disponible dans des articles de synthèse bien documentés, (Duplessy et al., 1976 ; Djindjian, 1991 ; Guiot et al., 1992, 1993, 1999, 2000 ; Labeyrie, 1984 ; Miskovsky et Gibert, 1993 ; Peyron et al., 1998 ; Pons et al., 1992).

Sur la période située entre environ 140 000 BP et l'actuel, les diagrammes polliniques de tourbières montrent que le couvert végétal oscille constamment entre une végétation de steppe ouverte froide et aride et une forêt dense, tempérée et humide. Nous présentons ici une méthode de reconstitution semi-quantitative des paléoclimats basée sur le calcul de courbes de paléotempérature / paléohumidité relatives déduites du traitement multivarié de séquences continues et sans perturbations, méthode de régression factorielle appliquée ici à l'ensemble du dernier cycle climatique, (Bosselin et Djindjian, sous presse). Après un bref rappel théorique, un exemple détaillé sera développé à partir de la tourbière de la Grande Pile. Suivra l'analyse d'autres séquences, d'amplitude plus réduite, permettant la construction puis la comparaison de plusieurs courbes climatiques. Ces résultats seront ensuite confrontés aux profils isotopiques issus de carottes océaniques et glaciaires, puis comparés avec ceux provenant de méthodes antérieures de reconstitution quantitative des paléoclimats. En découlera une structuration du Pléistocène supérieur, en référence au système de numérotation des oscillations proposé par les glaciologues au Groenland (événements de Dansgaard-Oeschger). Dans un dernier temps, le traitement statistique des niveaux Eemien de la Grande Pile nous permettra de proposer un modèle de la dynamique de la végétation et des climats au cours du dernier interglaciaire en Europe occidentale. Enfin, une conclusion rappellera les principaux résultats de cette étude.

II. LES SÉQUENCES POLLINIQUES DE TOURBIÈRES

II.1. Méthodologie

Nous avons sélectionné comme référence la tourbière de la Grande Pile, dont les séquences connues (respectivement pour les carottes I, XIV et X ; et pour la carotte XX) sont continues, sans hiatus, et ne présentent pas ou peu de perturbations. Les prélèvements correspondant à la plage chronologique s'étageant entre environ 140 000 et 6 000 BP, depuis la fin du Pléistocène moyen jusqu'au début de l'Holocène, et incluant l'Eemien et le Pléistocène supérieur, sont sélectionnés. Une typologie, relative au site étudié, des taxons est alors établie, en fonction des variations les plus importantes quantitativement et les plus significatives, en terme de paléoclimatologie, reconnues dans la séquence. Le tableau de fréquence ainsi constitué est traité par des techniques quantitatives : analyse factorielle des correspondances puis classification ascendante hiérarchique (méthode des voisins réductibles). L'interprétation des résultats du traitement statistique est ensuite réalisée en 3 étapes (Bosselin et Djindjian, sous presse) :

- interprétation des axes factoriels (dont l'inertie dépasse 10 % de l'information initiale) par recherche des pollens responsables de leur signification, puis analyse de leurs associations et de leurs oppositions en terme de paléotempérature et/ou de paléohumidité,
- détermination des zonations polliniques, à partir des classes de la classification ascendante hiérarchique,

- projection des niveaux de prélèvements sur le(s) axe(s) factoriel(s) qui traduit(ent) un gradient de température, un gradient d'humidité, ou les deux simultanément, permettant la construction de courbes paléoclimatiques relatives.

II.2. Les résultats du traitement statistique

Le premier diagramme continu de la Grande Pile a été publié par G. Woillard, en juxtaposant les carottes I, XIV et X, qui couvrent une séquence quasi-continue entre 140 000 BP et l'actuel, hormis un court hiatus correspondant au tardiglaciaire, (Woillard, 1978a et b, 1979, 1980 ; Woillard et Mook, 1982). A partir d'une typologie de 12 taxons (*Batrachium*, cypéracées, graminées, steppiques, *Alnus*, *Betula*, *Carpinus*, *Corylus*, *Picea*, *Pinus*, *Quercus* et *Juniperus*) et d'un plan d'échantillonnage le long de la coupe tous les 2,5 cm, le tableau de fréquence est traité par analyse factorielle des correspondances.

Le premier axe (37,4 % d'inertie) oppose les noisetiers, chênes et charmes aux steppiques, *Artemisia* et graminées. Il met en évidence un gradient de température / humidité, révélant une opposition entre une végétation de steppe froide et aride et un couvert forestier tempéré et humide. Le deuxième axe (20,0 % d'inertie) oppose les charmes, pins et épicéas aux noisetiers. Il introduit une distinction dans la végétation forestière précédente. Le troisième axe (10,1 % d'inertie) oppose les *Batrachium* et charmes aux pins et bouleaux. Le quatrième axe enfin (8,0 % d'inertie) oppose les pins et *Batrachium* aux cypéracées. Le plan factoriel 1-2 est présenté sur la figure 1. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les quatre premiers axes, met en évidence une structure de partition en 5 classes :

- un ensemble à graminées, cypéracées et steppiques, traduisant une végétation ouverte de milieu froid et sec,
- un ensemble à graminées, steppiques, quelques pins et *Batrachium*, traduisant une végétation ouverte de milieu froid mais moins aride,
- un ensemble mixte à pins et bouleaux dominants, avec quelques épicéas, sur un substrat de lande à graminées, traduisant une végétation forestière éparse (climat froid-frais et humide),
- un ensemble à charmes dominants, avec quelques noisetiers, chênes, aulnes, sapins et épicéas, traduisant une végétation forestière relativement tempérée et humide,
- un ensemble à chênes et noisetiers dominants, avec de rares charmes, bouleaux et pins, traduisant une végétation forestière tempérée et humide correspondant à un optimum climatique (sur ce site).

Plus récemment, A. Pons et al. ont publié une nouvelle séquence à la Grande Pile, issue de la carotte XX, (Pons et al., 1992). La même méthodologie a été appliquée à partir d'une typologie de 13 taxons (*Juniperus*, *Betula*, *Quercus*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Alnus*, *Carpinus*, *Abies*, *Picea*, *Pinus*, graminées, *Artemisia* et héliophiles) et un plan d'échantillonnage tous les 8 cm.

Le premier axe (44,1 % d'inertie) oppose les noisetiers, chênes et charmes aux graminées, héliophiles et *Artemisia*. Il met en évidence un gradient de température / humidité, révélant une opposition entre une végétation de steppe froide et aride et un couvert forestier tempéré et humide. Le deuxième axe (18,7 % d'inertie) oppose les chênes et noisetiers aux charmes, épicéas et sapins. Il introduit une distinction dans la végétation forestière précédente. Le troisième axe enfin (16,5 % d'inertie) oppose les charmes, noisetiers et graminées aux pins, bouleaux et épicéas. Le plan factoriel 1-2 est présenté sur la figure 2. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les trois premiers axes, met en évidence une structure de partition en 4 classes :

- un ensemble à graminées, héliophiles et *Artemisia*, traduisant une végétation ouverte de milieu froid et sec,
- un ensemble mixte à pins, bouleaux, épicéas et graminées, traduisant une végétation de forêt ouverte sur un substrat de lande/steppe de climat froid-frais devenant nettement plus humide,
- un ensemble à charmes et sapins dominants, avec quelques épicéas, aulnes, noisetiers et chênes, traduisant une végétation forestière relativement tempérée et humide,

- un ensemble à noisetiers et essences de la chênaie mixte dominants, avec quelques charmes et bouleaux, traduisant une végétation forestière tempérée et humide correspondant à un optimum climatique (sur ce site).

II.3. Les autres séquences polliniques

D'autres séquences polliniques, d'amplitude plus réduite ou situées en milieu méditerranéen, sont également disponibles pour un traitement quantitatif (Tenaghi-Philippon⁽⁴⁾, les Echets, le Lac du Bouchet), malgré l'existence manifeste d'indices de perturbations pour le sommet de ces deux derniers sites, empêchant leur analyse jusqu'à l'Holocène, (de Beaulieu et Reille, 1984a et b ; Pons et al., 1992 ; Wijnstra, 1969 ; Wijnstra et Smit, 1976).

A Tenaghi-Philippon, l'analyse factorielle des correspondances, menée à partir d'une typologie de 13 taxons (*Pinus*, *Quercus*, *Corylus*, *Betula*, *Juniperus*, *Carpinus*, *Abies*, chénopodiacées, *Artemisia*, graminées, steppiques, composées et aquatiques), conduit à une interprétation du premier axe (66,5 % d'inertie) en tant que gradient de température / humidité : opposition entre les charmes et les chênes d'une part et les *Artemisia* d'autre part. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les trois premiers axes, met en évidence une structure de partition en 3 classes : un ensemble froid et sec à graminées, chénopodiacées et *Artemisia*, un ensemble (mixte) froid-frais et plus humide à graminées, steppiques et pins, et un ensemble tempéré et humide à essences de la chênaie mixte et charmes.

Aux Echets, le traitement statistique de la séquence située entre la fin de la glaciation de Saale et le milieu du Würm, entre environ 140 000 et 60 000 BP, conduit à une interprétation du premier axe factoriel (33,7 % d'inertie) en tant que gradient de température / humidité, comme l'indique l'opposition entre d'une part les noisetiers, chênes et charmes et d'autre part les pins, graminées, chénopodiacées et *Artemisia*. De même au Lac du Bouchet, pour la même plage chronologique, le premier axe factoriel (45,9 % d'inertie) révèle une opposition entre d'une part les chênes, charmes et épicéas et d'autre part les graminées, steppiques et *Artemisia*, indiquant également un gradient de température / humidité.

Dans ces trois séquences issues de tourbières, la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel permet donc la construction de courbes traduisant l'évolution relative des paléoclimats (paléotempérature / paléohumidité), sur une période d'amplitude toutefois plus réduite qu'à la Grande Pile, entre environ 140 000 et 60 000 BP.

II.4. Synthèse

Les résultats du traitement statistique mettent en évidence, pour l'ensemble des séquences polliniques analysées ici, l'existence d'associations préférentielles de taxons interprétables en tant que gradient de température / humidité sur le premier axe factoriel, opposant d'une part une végétation ouverte de steppe à graminées, *Artemisia*, steppiques et/ou chénopodiacées (contexte climatique froid et sec), et d'autre part une végétation de forêt dense à noisetiers, chênes et charmes (contexte climatique tempéré et humide). Cela nous permet de présenter, sur la figure 3, plusieurs courbes de paléotempérature / paléohumidité relatives pour la période chronologique s'étageant entre environ 140 000 et 6 000 BP. Ces courbes, remarquablement corrélées entre elles, quelque soit leur origine géographique ou topographique : piémont du massif des Vosges pour la Grande Pile (latitude :

⁽⁴⁾ A Tenaghi-Philippon en Macédoine grecque, les essences méditerranéennes présentent un développement important lors des oscillations tempérées. Ainsi, le chêne apparaît dès l'oscillation de Bølling alors qu'il n'est significativement représenté qu'à partir du Boréal à la Grande Pile, empêchant une comparaison précise entre ces deux tourbières.

47°44' N - longitude : 6°30' E - altitude : 330 mètres), bassin côtier du Drama (Macédoine, Grèce) pour Tenaghi-Philippon (latitude : 41°10' N - longitude : 24°20' E - altitude : 40 mètres), marais situé sur le plateau des Dombes pour les Echets (latitude : environ 5°25' E - longitude : environ 45°42' N - altitude : 270 mètres), et plateau du Devès (Massif central) pour le lac du Bouchet (latitude : 44°55' N - longitude : 3°47' E - altitude : 1200 mètres), sont directement comparables avec les profils isotopiques enregistrés dans les sédiments marins et les glaces polaires. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

III. LE CADRE PALEOCLIMATIQUE DU DERNIER CYCLE CLIMATIQUE

III.1. Les analyses isotopiques des carottes océaniques et glaciaires

La figure 4 compare les courbes de paléotempérature / paléohumidité relatives obtenues à partir du traitement statistique des diagrammes polliniques de la Grande Pile (carottes I/XIV/X d'une part, carotte XX d'autre part) aux enregistrements isotopiques des foraminifères pélagiques (G. Bulloïdes) de la carotte KET 8022 située en Méditerranée occidentale (figure 4B) et des foraminifères benthiques de la carotte V 19-30 située dans le Pacifique (figure 4C), au profil $\delta^{18}\text{O}$ de la carotte de GRIP-Summit au Groenland (figure 4D), aux écarts de température par rapport à l'actuel déduits de la teneur en Deutérium du sondage de Vostok en Antarctique (figure 4E) et aux variations de la fréquence des foraminifères *N. Pachyderma* (s.) du site DSDP 609 situé dans l'Atlantique nord (figure 4F), (Bond et al., 1993 ; Dansgaard et al., 1993 ; Johnsen et al., 1995 ; Jouzel et Lorius, 1993 ; Paterné et al., 1984 ; Petit et al., 1999 ; Shackleton, 1967, 1987 ; Shackleton et Opdyke, 1973, 1976 ; Shackleton et al., 1983 ; Sowers et al., 1993).

Quelques différences apparaissent entre ces courbes, liées au fait que les profils isotopiques, les modifications dans la composition des foraminifères et les spectres polliniques traduisent des phénomènes non strictement identiques, n'ayant pas la même réponse vis à vis des variations de température et d'humidité. Ainsi, les changements climatiques sont plus prononcés à haute latitude, expliquant une meilleure résolution des carottes glaciaires du Groenland ($\delta^{18}\text{O}$) et océaniques de l'Atlantique nord (% *N. Pachyderma* s.). Les enregistrements marins sont eux indicatifs, en première approximation (cf. supra), du volume des glaces continentales, volume qui ne varie pas nécessairement avec la température pendant un interglaciaire, (Labeyrie, 1984). Enfin, le couvert végétal possède une inertie suffisamment importante pour laisser supposer des décalages chronologiques avec les autres méthodes. Enfin, dans tous les profils isotopiques analysés ici (KET 8022, V 19-30, GRIP-Summit et Vostok), l'Eemien apparaît comme une période nettement plus tempérée que l'Holocène d'une part, et que les autres termes « modérés » de l'interglaciaire Riss/Würm, en particulier pour les sous-stades 5a et 5c, d'autre part.

D'autres différences, plus mineures, sont également visibles. Ainsi, dans la carotte KET 8022, l'oscillation Bølling/Allerød n'est pas clairement visible, (Paterné et al., 1984). Dans la carotte V 19-30, le pléniglaciaire inférieur semble peu froid, et pratiquement au même niveau que l'interpléniglaciaire würmien sus-jacent, (Shackleton et al., 1983). Les données de GRIP-Summit (Dansgaard et al., 1993 ; Johnsen et al., 1997) suggèrent une forte instabilité de l'Eemien et de la période située entre environ 60 000 et 20 000 BP, mais ce phénomène, constaté également dans la carotte jumelle de GISP2 (Grootes et al., 1993 ; Weißmüller, 1997), est vraisemblablement lié à une circulation océan / atmosphère plus intense et plus rapidement changeante dans l'Atlantique nord (cf. la discussion qui en sera faite infra). A Vostok, si la courbe de température déduite de la teneur en Deutérium peut sembler mal différencier les termes médians du dernier cycle climatique (pléniglaciaire inférieur, interpléniglaciaire würmien et pléniglaciaire supérieur), les données isotopiques de l'oxygène et l'analyse des teneurs en méthane et en dioxyde de carbone confirment une structuration de la période située entre 140 000 et 6 000 BP identique à celle rencontrée sur les

autres sites, (Barnola et al., 1987 ; Basile et al., 1997 ; Chappellaz et al., 1990, 1993 ; Petit et al., 1990, 1999⁽⁵⁾ ; Sowers et al., 1993). A DSDP 609 dans l'Atlantique nord enfin (Bond et al., 1993), l'interpléniglaciaire würmien se caractérise par un contexte globalement modéré, simplement entrecoupé de très courtes pulsations plus froides, alors que les deux pléniglaciaires (inférieur et supérieur) apparaissent extrêmement rigoureux, et pratiquement sans réchauffement visible, mais ces différences proviennent vraisemblablement d'une forte réactivité des différentes espèces de foraminifères aux changements climatiques.

Toutefois, la similarité et le synchronisme général des données glaciaires, océaniques et continentales, déjà entrevus auparavant (Pujol et Turon, 1986 ; Steig et al., 1998 ; Tzedakis et al., 1997 ; Waelbroeck et al., 1995), nous autorise à proposer une structuration de la période située entre environ 140 000 et 9 000 BP en quatre phases, sur l'identité et la caractérisation desquelles nous reviendrons plus loin : l'interglaciaire Riss/Würm au sens large comprenant l'optimum climatique Eemien, le pléniglaciaire inférieur, l'interpléniglaciaire würmien et le pléniglaciaire supérieur, (Bosselin et Djindjian, sous presse).

III.2. Comparaison avec les constructions antérieures

Constatant que le taux de pollens d'arbres (AP) groupe des essences dont la signification climatique est sensiblement différente d'une part, et l'absence, dans les flores actuelles, de stricts équivalents des cortèges polliniques fossiles d'autre part, J. Guiot a publié plusieurs méthodes quantitatives de reconstitution des paléoclimats, basées sur des techniques statistiques complexes (inverse vegetation modeling by Monte-Carlo sampling, analogues series, paleobioclimatic operator, time-series analysis, ...), (Guiot, 1990 ; Guiot et al., 1987, 1989, 1992, 1993, 1999, 2000 ; Peyron et al., 1998 ; Pons et al., 1992). Dans l'une de ses premières publications, il propose une modélisation des variations, par rapport à l'actuel, de la température et des précipitations sur les derniers 140 000 ans pour les tourbières de la Grande Pile et des Echets, (Guiot et al., 1989).

La figure 5 compare les courbes de paléotempérature calculées par J. Guiot et celles obtenues par nous-mêmes. Quelques différences apparaissent entre ces résultats. Ainsi, dans la reconstruction de J. Guiot, les oscillations tempérées situées entre environ 60 000 et 28 000 BP, contemporaines de l'interpléniglaciaire würmien, n'apparaissent pas toujours clairement. Le pléniglaciaire inférieur semble relativement modéré, et peu différencié de l'interpléniglaciaire würmien sus-jacent. Enfin, les sous-stades du stade isotopique 5 présentent un décalage chronologique, mais ce fait est vraisemblablement lié à la difficulté de reconstruire, sans les données de la chronologie absolue au-delà de 35 000 BP, une échelle linéaire de temps fiable.

A la Grande Pile et aux Echets toutefois, les courbes climatiques obtenues suivant les deux méthodes, remarquablement similaires et corrélées entre elles, permettent de confirmer une structure du Pléistocène supérieur en 4 stades, notés conventionnellement de bas en haut dans la séquence : IS 5 globalement chaud (interglaciaire Riss/Würm), divisé en 5 sous-phases 5a, 5b, 5c, 5d et 5e, cette dernière correspondant à l'optimum climatique Eemien, IS 4 froid et sec (pléniglaciaire inférieur), IS 3 plus doux et plus humide (interpléniglaciaire würmien) et IS 2 froid et sec (pléniglaciaire supérieur), (Emiliani, 1955 ; Labeyrie, 1984).

En conclusion, notre méthode statistique offre la possibilité de construire une courbe de paléotempérature / paléohumidité relative qui, malgré un niveau de précision n'autorisant pas une

⁽⁵⁾ A Vostok en outre, les variations de la teneur en sodium et en poussières complètent ces analyses, en nous renseignant sur l'aridité ou la sécheresse des dépôts correspondants et le régime des vents australs contemporains, (Petit et al., 1999).

reconstruction à l'échelle du mois, fournit une estimation semi-quantitative des paléoclimats remarquablement proche de celle obtenue par des techniques plus complexes à mettre en œuvre.

III.3. Le Pléistocène supérieur : les oscillations climatiques et leur numérotation

Le Pléistocène supérieur présente donc une structuration en quatre phases : l'interglaciaire Riss/Würm, le pléniglaciaire inférieur, l'interpléniglaciaire würmien et le pléniglaciaire supérieur.

L'interglaciaire Riss/Würm (IS 5 entre environ 130 000 et 75 000 BP) se compose de trois sous-stades tempérés et humides (IS 5a, 5c et 5e), à végétation forestière dominée par les essences thermo-mésophiles (chêne, noisetier, charme, frêne, sapin, épicéa, aulne), séparés par deux coups de froid brefs mais relativement bien marqués (IS 5b et 5d), à végétation de steppe aride à graminées, steppiques et *Artemisia*. Au cours de *l'Eemien stricto sensu* (entre environ 130 000 et 118 000 BP), la composition de la couverture arborée évolue, traduisant mieux les variations des paléoclimats que la simple représentation du taux de pollens d'arbres (cf. infra), ce qui réduit la durée de l'optimum climatique, en accord avec la courbe SPECMAP, (Martinson et al., 1987). En accord avec L. Labeyrie (Labeyrie, 1984, p. 47), le début de la glaciation du Würm coïncide donc, non pas à la fin de *l'Eemien stricto sensu* vers 118 000 BP, mais avec la transition entre les stades isotopiques 5a et 4 vers 75 000 BP, transition marquée par la formation des calottes glaciaires qui se développeront ensuite pendant près de 60 000 ans.

Le pléniglaciaire inférieur (IS 4 entre environ 75 000 et 60 000 BP) se caractérise par un net refroidissement et une aridification du climat, traduits par le retour d'une végétation de steppe ouverte à graminées, cypéracées, steppiques, *Batrachium* et *Artemisia*. **L'interpléniglaciaire würmien** (IS 3 entre environ 60 000 et 28 000 BP) se caractérise par une instabilité du climat et de la végétation, voyant l'alternance rapide d'oscillations froides et sèches, à végétation de steppe ouverte à graminées, cypéracées, steppiques et *Artemisia*, et d'oscillations plus douces et plus humides, à végétation de forêt ouverte à genévriers, pins, bouleaux et quelques essences thermo-mésophiles. **Le pléniglaciaire supérieur** (IS 2 entre environ 28 000 et 13 000 BP) se caractérise par le retour d'un contexte très froid et très sec, à végétation de steppe ouverte à graminées, cypéracées et *Artemisia*. Quelques oscillations plus humides, à *Batrachium* et *Potamogeton*, sont visibles, mais faiblement marquées thermiquement. A partir de 15 000 BP, et jusqu'à 9 000 BP, on assiste à l'établissement progressif des conditions climatiques tempérées actuelles (IS 1 : Holocène).

Dans un travail en collaboration (Bosselin et Djindjian, sous presse), nous avons présenté une corrélation entre le système de numérotation des événements de Dansgaard-Oeschger reconnus dans les calottes glaciaires du Groenland et les oscillations classiquement et historiquement utilisées dans les stratotypes continentaux, pour la période s'étageant entre environ 40 000 - 42 000 BP et l'actuel.

Événements de Dansgaard-Oeschger	Dénomination pollinique historique	Numérotation B. Bosselin et F. Djindjian (sous presse)
1	Allerød / Bølling	1a : Allerød - 1b : Bølling
2	Lascaux / Laugerie	2a : Lascaux - 2b : Laugerie
3/4	Tursac	3 : Tursac
5	Maisières	4a : Maisières
6/7	Arcy (Denekamp)	4b : Arcy
8	Les Cottés	5a : Les Cottés
9-11	?	?
12	Hengelo	5b : Hengelo

Il convient maintenant de compléter ce système, jusqu'à l'Eemien. Après l'oscillation d'Hengelo, la courbe de paléotempérature / paléohumidité relative calculée à la Grande Pile (carottes XIV/X⁽⁶⁾) met en évidence, de haut en bas dans la séquence : un complexe de pulsations mal différenciées ; puis une période globalement froide et sèche ; et enfin un ensemble interglaciaire composé de trois oscillations d'amplitude thermique marquée, séparées par deux coups de froid intenses. Par comparaison avec les données de GRIP-Summit, il est aisé d'y reconnaître respectivement, malgré une résolution plus fine des profils isotopiques du Groenland : le complexe de Moershoofd comprenant les événements de Dansgaard-Oeschger 13 à 17/18 mal différenciés (base du stade isotopique 3) ; puis le pléniglaciaire inférieur (stade isotopique 4) incluant les événements de Dansgaard-Oeschger 19 et 20 ; et enfin l'interglaciaire Riss/Würm au sens large (stade isotopique 5) composé des oscillations d'Odderade (événement de Dansgaard-Oeschger 21), de Brørup (événement de Dansgaard-Oeschger 23) et d'Amersfoort (événement de Dansgaard-Oeschger 24), avant l'Eemien stricto sensu (IS 5e), (Behre et Van der Plicht, 1992 ; Bender et al., 1994 ; Bond et al., 1993 ; Chappellaz et al., 1990, 1993 ; Dansgaard et al., 1993 ; Fronval et al., 1995 ; Johnsen et al., 1992 ; Weißmüller, 1997).

La figure 6 propose donc un tableau de corrélation entre le système de numérotation des événements de Dansgaard-Oeschger reconnus dans les glaces du Groenland (Dansgaard et al., 1993 ; Weißmüller, 1997), les oscillations climatiques déduites du traitement statistique des diagrammes polliniques de la Grande Pile, les dénominations proposées par G. Woillard et T.A. Wijmstra, respectivement à la Grande Pile et Tenaghi-Philippou (Woillard, 1978a et b, 1979, 1980 ; Wijmstra, 1969 ; Wijmstra et Smit, 1976), et celles historiquement utilisées dans les séquences continentales.

Une incertitude reste cependant à lever au sujet de la position chronologique des oscillations d'Amersfoort, de Brørup et d'Odderade. Deux hypothèses ont été envisagées par G. Woillard à la Grande Pile, soit une corrélation avec Ognon I, II et III, soit une corrélation avec St Germain Ia, St Germain Ic et St Germain II, (Woillard, 1978a et b, 1979, 1980). Pendant Ognon I, on assiste à la mise en place d'une forêt éparse, constituée essentiellement de pins et de bouleaux mais sans espèces thermophiles, traduisant une simple augmentation de l'humidité dans un contexte toujours froid, (Woillard, 1978a et b, 1979, 1980). Ognon II et III, situés à l'interface des carottes XIV et X, posent le problème de la corrélation entre ces deux séquences, en accord avec E. Grüger puis J.L. de Beaulieu et M. Reille qui considèrent ces épisodes comme le reflet de perturbations, (de Beaulieu et Reille, 1984a et b, 1992 ; Guiot et al., 1992 ; Grüger, 1979). Enfin, la reconnaissance quasi-systématique des oscillations d'Amersfoort, de Brørup et d'Odderade dans les stratotypes continentaux, en Allemagne, au Danemark et au Pays-Bas, nous incite à privilégier la seconde hypothèse de G. Woillard, rejetant alors Ognon I, II et III comme de simples harmoniques lors de la dynamique du refroidissement des climats à l'interface fin du dernier interglaciaire / début du Würm⁽⁷⁾. Cela nous permet en outre d'assigner à ces dénominations historiques une position chronologique plus ancienne : entre environ 113 000 et 109 000 BP pour Amersfoort (courte rémission climatique pendant le sous-stade isotopique 5d froid), entre environ 106 000 et 96 000 BP pour Brørup (IS 5c) et entre environ 87 000 et 75 000 BP pour Odderade (IS 5a), comme l'avait d'ailleurs prédit J.Cl. Duplessy dès 1976, (Duplessy et al., 1976).

Par ailleurs, l'Eemien apparaît comme une période instable à GRIP-Summit et dans les sédiments océaniques de l'Atlantique nord et de la mer de Norvège, (Cortijo et al., 1994 ; Dansgaard et al.,

⁽⁶⁾ La courbe obtenue à partir de la carotte XX étant similaire, elle ne sera pas présentée ici.

⁽⁷⁾ Une discussion détaillée sur la position chronologique de ces oscillations est disponible dans : de Beaulieu et Reille, 1984a et b, 1992 ; Duplessy et al., 1976 ; Woillard, 1978a et b, 1979, 1980.

1993 ; Johnsen et al., 1997 ; Maslin, 1996 ; Weißmüller, 1997). Contrairement dans les tourbières, les courbes de paléotempérature / paléohumidité relatives sont régulières. En accord avec la discussion précédente, la dénomination historique d'Amersfoort correspond donc plus vraisemblablement avec la double pulsation située par W. Dansgaard et W. Weißmüller à la fin de l'Eemien (vers 120 000 BP), que nous avons chronologiquement recalée vers 110 000 BP et renumérotée « événement de Dansgaard-Oeschger 24 » (oscillation composite 11 a/b dans notre système). Cela nous conduit à modérer l'impact de la faible rémission climatique (harmonique ?), précédant l'oscillation de Brørup, et correspondant à l'ancien événement de Dansgaard-Oeschger 24. Les événements 23 à 21 (respectivement Brørup, sans nom, et Odderade) restent enfin inchangés, chronologiquement et stratigraphiquement (Figure 6)⁽⁸⁾.

En conclusion, le Pléistocène supérieur se divise globalement en une période tempérée et humide correspondant à l'interglaciaire Riss/Würm, entre environ 130 000 et 75 000 BP, et une période froide et sèche correspondant à la glaciation du Würm, entre environ 75 000 et 13 000 BP, (Labeyrie, 1984). A un niveau d'explication plus fin, l'analyse comparative des données océaniques, glaciaires et continentales nous a permis de structurer le dernier cycle climatique en quatre phases correspondant aux stades isotopiques de C. Emiliani (Emiliani, 1955) et à l'intérieur desquels sont visibles plusieurs oscillations climatiques, de portée inégale, corrélées avec les événements de Dansgaard-Oeschger reconnus dans les glaces du Groenland.

IV. LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION AU COURS DU DERNIER INTERGLACIAIRE EN DOMAINE ATLANTIQUE

La dynamique de la végétation au cours de l'Eemien a été étudiée à partir des diagrammes de la Grande Pile (carottes X et XX), suivant une même méthodologie que celle développée précédemment.

Le traitement statistique des niveaux de la carotte X situés entre les côtes 15,625 et 18,075 met en évidence, sur le premier axe factoriel (49,7 % d'inertie), une opposition entre d'une part le noisetier, et d'autre part le pin, le bouleau et l'épicéa. Sur le deuxième axe (31,2 % d'inertie), le noisetier est opposé au charme, au sapin et à l'aulne. Sur le troisième axe enfin (6,5 % d'inertie) le sapin et l'épicéa sont opposés au pin et au charme. Le plan factoriel 1-2 est présenté sur la figure 7a. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les 3 premiers axes, met en évidence une partition en 3 classes (les pourcentages correspondent aux moyennes calculées pour chaque classe) :

- un ensemble à pins (46 %), épicéas (21 %) et bouleaux (14 %),
- un ensemble à charmes (37 %), noisetiers (14 %), aulnes (13 %), ifs (12 %)⁽⁸⁾ et chênes (9 %),
- un ensemble à noisetiers (47 %), chênes (24 %) et ifs (10 %).

Le même traitement appliqué aux niveaux de la carotte XX situés entre les côtes 15,36 et 18,08 met en évidence, sur le premier axe factoriel (42,4 % d'inertie), une opposition entre d'une part le noisetier, et d'autre part le pin, le bouleau et l'épicéa. Sur le deuxième axe (33,2 % d'inertie), le noisetier et le chêne sont opposés au charme et au sapin. Enfin, sur le troisième axe (11,7 % d'inertie), l'épicéa est opposé au bouleau et au charme. Le plan factoriel 1-2 est présenté sur la figure 7b. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les 3 premiers axes, met en

⁽⁸⁾ Les événements de Dansgaard-Oeschger sont également visibles dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord des sites VEMA 23-81 et DSDP 609, (Bond et al., 1997). Ils se structurent en plusieurs cycles de refroidissement terminés chacun par une décharge d'icebergs dans l'océan, correspondant aux événements de Heinrich, et immédiatement suivis par une augmentation de la température et des indicateurs physico-chimiques et écologiques qui l'accompagnent : croissance du rapport $\delta^{18}\text{O}$ et réduction de la fréquence des *N. Pachyderma* (s.).

évidence une partition en 4 classes (les pourcentages correspondent aux moyennes calculées pour chaque classe) :

- un ensemble à bouleaux (57 %), pins (29 %) et graminées (14 %),
- un ensemble à noisetiers (50 %), chênes (33 %) et ifs (12 %)⁽⁹⁾,
- un ensemble à charmes (40 %), sapins (24 %), noisetiers (15 %), chênes (14 %), aulnes (12 %) et épicéas (10 %),
- un ensemble à pins (44 %), épicéas (23 %), bouleaux (15 %) et graminées (8 %).

Ces deux analyses permettent de modéliser la dynamique de la végétation au cours d'un interglaciaire en cinq phases : une forêt pré-tempérée, une phase progressive, l'optimum climatique, une phase régressive, et enfin une forêt post-tempérée, en accord avec les travaux antérieurs, (de Beaulieu et Suc, 1985 ; Turner et West, 1968 in Woillard, 1979).

La forêt pré-tempérée, encore ouverte, est principalement composée d'essences pionnières, comme le bouleau et le pin, colonisant graduellement un substrat de lande/steppe à graminées et steppiques. Au cours de la phase progressive, on assiste à une densification rapide de la couverture arborée et à l'expansion des taxons méso-thermophiles, comme le noisetier et le chêne. Cette évolution culminera ensuite avec l'optimum climatique, caractérisé par la prédominance de la chênaie mixte. Suit ensuite une phase régressive, voyant la réduction modérée des essences thermophiles (chênaie mixte et noisetier), réduction compensée par le développement du charme, puis du sapin et de l'épicéa⁽¹⁰⁾. Dans un dernier temps, la forêt post-tempérée, devenant nettement plus éparse, voit la disparition rapide des taxons méso-thermophiles, au profit d'espèces dont la signification écologique est plus froide et plus sèche, comme le pin et le bouleau, avec quelques sapins et épicéas résiduels.

Dans ces analyses, l'épisode froid intra-Eemien n'est pas visible, au contraire de certaines carottes océaniques et glaciaires où l'instabilité climatique de cette période a été entrevue (Bond et al., 1993 ; Cortijo et al., 1994 ; Dansgaard et al., 1993 ; Maslin, 1996 ; Weißmüller, 1997), vraisemblablement du fait de la brièveté de cette pulsation et de l'inertie du couvert végétal, ne permettant pas l'installation d'une végétation (plus éparse) traduisant un climat peut-être ponctuellement plus frais et plus sec, mais dans un contexte toujours globalement tempéré et humide.

En conclusion, les traitements statistiques menés sur les prélèvements polliniques situés dans la plage chronologique correspondant à l'Eemien, entre environ 130 000 et 118 000 BP, nous permettent de confirmer la succession des types de couvert forestier au cours d'un interglaciaire, phénomène cyclique traduisant fidèlement l'évolution des paléoclimats, tant sur le plan des variations de la température que de l'humidité.

V. CONCLUSION

Les carottes océaniques (océan Pacifique, mer Méditerranée, océan Atlantique nord), les carottes glaciaires (Groenland et Antarctique) et les longues séquences polliniques de tourbières (la Grande Pile, Tenaghi-Philippou, les Echets et le Lac du Bouchet) fournissent des enregistrements isotopiques, polliniques et microfaunistiques caractérisés par une excellente similitude de leur signal paléoclimatique pour l'ensemble du Pléistocène supérieur.

⁽⁹⁾ Dans cette analyse, les ifs (*Taxus*) ont été traités en élément supplémentaire, de façon à ne pas créer un axe « parasite » correspondant à l'épisode de courte durée où cette essence se développe massivement, mais ponctuellement. En conséquence, l'ensemble à noisetiers et chênes de la classification regroupe également la phase à *Taxus* située entre les côtes 17,00 et 17,51.

⁽¹⁰⁾ Dans le Jura et le Massif central en outre, cette phase voit l'apparition et le développement du hêtre, absent à la Grande Pile, (de Beaulieu et al., 1988 ; Reille et de Beaulieu, 1988 ; Ruffaldi, 1991 ; Wegmüller, 1966).

La méthode proposée ici, basée sur le calcul de courbes de paléotempérature / paléohumidité relatives par analyse factorielle des correspondances (régression factorielle), a été appliquée aux séquences polliniques de tourbières. Elle a permis de structurer, en accord avec le découpage des stades isotopiques de C. Emiliani, la période située entre environ 140 000 et 9 000 BP en quatre phases : l'interglaciaire Riss/Würm englobant l'optimum climatique Eemien, le pléniglaciaire inférieur, l'interpléniglaciaire würmien et le pléniglaciaire supérieur, précédant l'Holocène. Cette construction semi-quantitative, comparée à d'autres méthodes quantitatives de reconstitution des paléoclimats, plus complexes et plus difficiles à mettre en œuvre, fournit des résultats éminemment proches.

Plusieurs oscillations à caractère tempéré et/ou humide ont ainsi été reconnues, puis comparées et aisément corrélées avec la numérotation des événements de Dansgaard-Oeschger introduite par les glaciologues dans les sondages de Summit (GRIP et GISP2) au Groenland, et dont une adaptation a été proposée et étendue à l'ensemble du Pléistocène supérieur. Ces résultats nous ont en outre permis de préciser la position des dénominations « historiques » d'Amersfoort, de Brørup et d'Odderade, maintenant mieux situées stratigraphiquement et chronologiquement à la fin de l'interglaciaire Riss/Würm entre environ 115 000 et 75 000 BP, et de constater, peut-être encore provisoirement, une certaine stabilité climatique de l'Eemien.

Cette méthodologie, appliquée enfin aux seuls dépôts Eemiens, met en évidence une dynamique de la végétation forestière traduisant plus fidèlement les variations de paléotempérature et de paléohumidité que la simple représentation du taux de pollens d'arbres (AP), qui, ne variant pratiquement pas au cours de cette période, ne constitue plus un indicateur climatique absolu.

BIBLIOGRAPHIE

- Barnola J.M. et al., (1987) - Vostok ice core provides 160,000 years record of atmospheric CO₂. *Nature*, **329**, 1990, pp. 408-414.
- Bartlein P.J. et Prentice I.C. (1986) - Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American taxa. *Journ. of Biogeogr.*, **13**, 1986, pp. 35-57.
- Basile I. et al., (1997) - Patagonian origin dust deposited in East Antarctica (Vostok and Dome C) during glacial stages 2, 4 and 6. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **146**, 1997, pp. 573-589.
- de Beaulieu J.L. et Reille M., (1984a) - A long upper Pleistocene pollen record from Les Echets, near Lyon (France). *Boreas*, **13**, 1984, pp. 111-132.
- de Beaulieu J.L. et Reille M., (1984b) - The pollen sequence of Les Echets (France) : a new element for the chronology of the Upper Pleistocene. *Géographie physique et humaine*, **38** (1), 1984, pp. 3-9.
- de Beaulieu J.L. et Reille M. (1992) - The last climatic cycle at la Grande Pile (Vosges, France). A new pollen profile. *Quatern. Sc. Reviews*, **11**, 1992, pp. 431-438.
- de Beaulieu J.L. et Suc J.P., (1985) - Histoire et archéologie. 93, 1985, pp. 67-74 (in M. Magny : *Une histoire du climat. Des derniers mammouths au siècle de l'automobile*, Ed. Errance, Paris, 1995).
- de Beaulieu J.L. et al., (1988) - Histoire de la flore et de la végétation du Massif Central (France) depuis la fin de la dernière glaciation. *Cahiers de Micropaléontologie*, **3** (4), 1988, pp. 5-36.
- Behre K.E. et Van der Plicht J., (1992) - Towards an absolute chronology for the last glacial period in Europe : radiocarbon dates from Oerel, northern Germany. *Vegetation History and Archeobotany*, **1**, 1992, pp. 111-117.
- Bender M. et al., (1994) - Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100,000 years. *Nature*, **372**, 1994, pp. 663-666.

- Berger A. et Loutre M.F., (1992) - Astronomical solutions for palaeoclimatic studies over the last 3 million years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**, 1992, pp. 369-382.
- Berger A. et al., (1983) - Approche astronomique des variations paléoclimatiques. In « *Paléoclimats* », Actes du colloque AGSO, Bordeaux, Cahier du Quaternaire, n° spécial, 1983, pp. 7-26.
- Berger A. et al., (1984) - *Milankovitch and climate*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1984.
- Berger A. et al., (1992) - Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for palaeoclimatic studies. *Science*, **255**, 1992, pp. 560-566.
- Blasing T.J., (1978) - Time series and multivariate analysis in palaeoclimatology. in H.H. Shugart Jr. ed. : « *Time series and ecological processes* », Society for industrial and applied mathematics of Philadelphia, SIAM-SIMS conference serie 5, 1978, pp. 213-228.
- Bond G. et al., (1993) - Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 1993, pp. 143-147.
- Bosselin B. et Djindjian F., (sous presse) - La reconstitution de la végétation et des climats du Würm récent et du début de l'Holocène. I- Une synthèse climatique déduite de l'analyse des séquences polliniques de tourbières. *Quaternaire, Bull. de l'AFEQ*, sous presse.
- Box G.E.P. et Jenkins J.M., (1970) - *Time series analysis : forecasting and control*. New York, Holden Day, 1970.
- Chappellaz J. et al., (1990) - Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years. *Nature*, **345**, 1990, pp. 127-131.
- Chappellaz J. et al., (1993) - Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature*, **366**, 1993, pp. 443-445.
- Cortijo E. et al., (1994) - Eemian cooling in the Norwegian Sea and North Atlantic ocean preceding ice-sheet growth. *Nature*, **372**, 1994, pp. 446-449.
- Dahl-Jensen D. et al., (1998) - Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science*, **282**, 1998, pp. 268-271.
- Dansgaard W. et al., (1993) - Evidence for general instability of the past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 1993, pp. 218-220.
- Djindjian F., (1991) - *Méthodes pour l'archéologie*. Armand Colin ed., Paris, 1991.
- Duplessy J.Cl. et al., (1976) - Paléoclimatologie des temps quaternaires à l'aide des méthodes nucléaires. In : « *La Préhistoire Française* », vol. **I-1**, 1976, pp. 352-361.
- Emiliani C., (1955) - Pleistocene temperatures. *Journ. of Geol.*, **63**, 1955, pp. 538-578.
- Fronval T. et al., (1995) - Oceanic evidence for coherent fluctuations in Fennoscandian and Laurentide ice sheets on millenium timescales. *Nature*, **374**, 1995, pp. 443-446.
- Govaerts Y. et al., (1986) - Analyse du comportement climatique en fréquence et en phase pour le dernier cycle glaciaire-interglaciaire. *Bull. de l'AFEQ*, **25-26**, 1986, pp. 7-16.
- Grootes P.M. et al., (1993) - Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland Ice Cores. *Nature*, **366**, 1993, pp. 552-554.
- Grüger E., (1979) - Spätriss, Riss/Würm und Frühwürm am Samerberg in Oberbayern. Ein Vegetationsgeschichtlicher Beitrag zur Gliederung des Jundpleistozäns. *Geologica bavarica*, **80**, 1979, pp. 5-64.
- Guiot J., (1990) - Methodology of the last climatic cycle reconstruction in French from pollen data. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **80**, 1990, pp. 49-69.
- Guiot J. et al., (1987) - Late quaternary climatic change in France estimated from multivariate pollen time series. *Quatern. Res.*, **28**, 1987, pp. 100-118.

- Guiot J. et al., (1989) - A 140,000 year continental climate reconstruction from two European pollen records. *Nature*, **338**, 1989, pp. 309-313.
- Guiot J. et al., (1992) - Calibration of the climatic signal in a new pollen sequence from La Grande Pile. *Climate Dynamics*, **6**, 1992, pp. 259-264.
- Guiot J. et al., (1993) - The climate in Western Europe during the last Glacial/Interglacial cycle derived from pollen and insect remains. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **103**, 1993, pp. 73-93.
- Guiot J. et al., (1999) - The climate of the Mediterranean Basin and of Eurasia of the last glacial maximum as reconstructed by inverse vegetation modelling and pollen data. *Ecologia Mediterranea*, **25** (2), 1999, pp. 193-204.
- Guiot J. et al., (2000) - Inverse vegetation modeling by Monte-Carlo sampling to reconstruct palaeoclimates under changed precipitation seasonality and CO₂ conditions : application to glacial climate in Mediterranean region. *Ecological Modelling*, **127**, 2000, pp. 119-140.
- Harrell J. et Briskin M., (1980) - Time series analysis of the Pleistocene deep-sea palaeoclimatic records using periodic regression. *Marine Geology*, **36**, 1980, pp. 1-22.
- Hays J. et al., (1976) - Variations in the Earth's orbit : Pacemaker of the ice ages. *Science*, **194**, 1976, pp. 1121-1132.
- Hoffmann G. et al., (sous presse) - Stable water isotopes in atmospheric general circulation models. *Hydrol. Processes*, sous presse.
- Imbrie J. (1992) - On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing. *Palaeoceanography*, **7**, 1992, pp. 701-738.
- Imbrie J. et Kipp N.G., (1971) - A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology : application to a late Pleistocene Caribbean core. In K.K. Turrekian ed. : « *Late Cenozoic Glacial Ages* ».
- Imbrie J. et al., (1984) - The orbital theory of Pleistocene climate : support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In A. Berger ed. : « *Milankovitch and climate* », D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, vol. 1, pp. 269-305.
- Johnsen S.J. et al., (1992) - Irregular glacial interstadials in a new Greenland ice-core. *Nature*, **359**, 1992, pp. 311-313.
- Johnsen S.J. et al., (1995) - Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles. *Tellus*, **47B**, 1995, pp. 624-629.
- Johnsen S.J. et al., (1997) - The $\delta^{18}\text{O}$ record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Eemian climatic instability. *Journ. of Geophys. Res.*, **102**, 1997, pp. 26397-26410.
- Jouzel J. et Lorius Cl., (1993) - Utilisation des isotopes stables de l'eau en climatologie et paléoclimatologie : l'exemple des glaces polaires. In « *Atome et Géologie* », *Soc. Géol. Fr.*, **Mémoire 162**, 1993, pp. 189-198.
- Krinner G. et al., (1997) - GCM analysis of local influences on ice core δ signals. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1997, pp. 2825-2828.
- Labeyrie L., (1984) - Le cadre paléoclimatique depuis 140 000 ans. *L'Anthropologie*, **88** (1), 1984, pp. 19-48.
- Mc Kenna T.E. et al., (1988) - Quantitative techniques in isotope chronostratigraphy. *Palaeo*, **64**, 1988, pp. 241-264.
- Martinson D.G. et al., (1987) - Age dating and the orbital theory of the ice ages : development of a high-resolution 0 to 3,000,000 year chronostratigraphy. *Quatern. Res.*, **7**, 1987, pp. 1-29.
- Maslin M., (1996) - Intra-Eemian cold event. *Terra Nova*, **8**, 1996, p. 5.
- Milankovitch M., (1938) - Die Chronologie des Pleistozäns. *Bull. Acad. Nat. Sc. Math.*, Belgrade, **4**, 1938, p. 49.
- Miskovsky J.Cl. et Gibert E., (1993) - L'atome au service de la Préhistoire : le cadre géologique de l'homme fossile à la lumière des datations et des données isotopiques. in « *Atome et Géologie* », *Soc. Géol. Fr.*, **Mémoire 162**, 1993, pp. 71-84.
- Mörner N.A., (1992) - Sea-level changes and the earth's rate of rotation. *J. Coast. Res.*, **8** (4), 1992, pp. 966-971.

- Paterne M. et al., (1984) - Variations climatiques en mer Tyrrhénienne depuis 140 000 ans. *Prépub. C.F.R.*, CNRS, 1984.
- Petit J.R. et al., (1990) - Paleoclimatological implications of the Vostok core dust record. *Nature*, **343**, 1990, pp. 56-58.
- Petit J.R. et al., (1999) - Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 1999, pp. 429-436.
- Peyron O. et al., (1998) - Climatic Reconstruction in Europe for 18,000 YR B.P. from Pollen Data. *Quatern. Res.*, **49**, 1998, pp. 1983-196.
- Pisias N.G. et al., (1973) - Spectral analysis of late Pleistocene-Holocene sediments. *Quatern. Res.*, **3**, 1973, pp. 3-9.
- Pisias N.G. et al., (1984) - High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 30 000 years. *Marine Geol.*, **56**, 1984, pp. 119-156.
- Pons A. et al., (1992) - Recent contributions to the climatology of the last glacial-interglacial cycle based on french pollen sequences. *Quatern. Sc. Reviews*, **11**, 1992, pp. 439-448.
- Prentice I.C. et al., (1992) - A global biome model based on plant physiology and dominance, soils properties and climates. *Journ. of Biogeogr.*, **19**, 1992, pp. 117-134.
- Prentice I.C. et al., (1996) - Reconstructing biomes from palaeoecological data. A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*, **12**, 1996, pp. 185-194.
- Pujol C. et Turon J.L. (1986) - Comparaison des cycles climatiques en domaines marin et continental entre 131 000 et 28 000 BP dans l'hémisphère nord. *Bull. de l'AFEQ*, **25-26** (1/2), 1986, pp. 17-25.
- Reille M. et de Beaulieu J.L., (1988) - History of the Würm and Holocene vegetation in Western Velay (Massif Central, France) : A comparison of pollen analysis from three corings at Lac du Bouchet. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **54**, 1988, pp. 233-248.
- Ruffaldi P., (1991) - Première contribution à l'étude de la végétation tardiglaciaire et holocène du Bugey : l'exemple de la tourbière de Cerin (Ain, France). *Revue de Paléobiologie*, **10** (1), 1991, pp. 137-149.
- Sachs H.M. et al., (1977) - Paleoeological transfert functions. *Ann. Rev. Earth Planet. Sc.*, **5**, 1977, pp. 159-178.
- Salamatin A.N. et al., (1998) - Ice core age dating and palaeothermometer calibration on the basis of isotopes and temperature profiles from deep boreholes at Vostok station (East Antarctica). *J. Geophys. Res.*, **103**, 1998, pp. 8963-8977.
- Shackleton N.C., (1967) - Oxygen isotope analysis and Pleistocene temperature reassessed. *Nature*, **215**, 1967, pp. 15-17.
- Shackleton N.C., (1987) - Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quatern. Res.*, **6**, 1987, pp. 183-190.
- Shackleton N.J. et Opdyke N.D., (1973) - Oxygen isotopes and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V 28-238 : oxygen isotopes temperatures and ice volumes on a 10^5 and 10^6 years scale. *Quatern. Res.*, **3**, 1973, pp. 39-55.
- Shackleton N.J. et Opdyke N.D., (1976) - Oxygen isotopes and Paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V 28-239 late Pliocene to latest Pleistocene. In Cline R.M. et Hays J.D. eds. : « *Investigation of late Quaternary paleogeography and paleontology* », *Geol. Soc. Am. Mem.*, **145**, 1967, p. 449-464.
- Shackleton N.J. et al., (1983) - Oxygen and carbon isotope record of East Pacific core V 19-30 : implications for the formation of deep water in the late Pleistocene North Atlantic. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **65**, 1983, pp. 233-244.
- Sowers T. et al., (1993) - 135 000 years Vostok-SPECMAP common temporal framework. *Palaeoceanography*, **8**, 1993, pp. 737-766.
- Steig. E. et al., (1998) - Synchronous climatic changes in Antarctica and the North Atlantic. *Science*, **282**, 1998, pp. 92-95.

- Tzedakis P.C. et al., (1997) - Comparison of terrestrial and marine records of changing climate of the last 500,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **150**, 1997, pp. 171-176.
- Urey H.C., (1947) - The Thermodynamic properties of isotopic substances. *Journ. of Chem. Soc.*, 1947, pp. 562-581.
- Van Donk J., (1976) - ^{18}O record of the Atlantic Ocean for the entire Pleistocene Epoch. In R.M. Chine et J.D. Hays eds. : « *Investigation of Late Quaternary paleogeography and paleontology* », *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **145**, 1976, pp. 147-163.
- Waelbroeck C. et al., (1995) - A comparison of the Vostok ice-deuterium record and series from Southern Ocean core MD 88-770 over the last 2 glacial-interglacial cycles. *Climate Dynamics*, **12**, 1995, pp. 113-123.
- Webb III T. Et Bryson R.A., (1972) - Late- and Postglacial climatic change in the northwest Midwest USA : quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistical analysis. *Quatern. Res.*, **2**, 1972, pp. 70-115.
- Wegmüller S., (1966) - *Über die spät- und Postglaziale Vegetationgeschichte des südwestlichen Jura*. Berne, Verlag Hans Hüber, 1966.
- Weißmüller W., (1997) - Eine Korrelation der $\delta^{18}\text{O}$ -Ereignisse des grönländischen Festlandeises mit den Interstadialen des atlantischen und des kontinentalen Europa im Zeitraum von 45 bis 14 ka. *Quärtär*, **47/48**, 1997, pp. 89-111.
- Wijmstra T.A., (1969) - Palynology of the first 30 meters of a 120 m deep section in northern Greece. *Acta Botanica Neerland.*, **18** (4), 1969, pp. 511-527.
- Wijmstra T.A. et Smit A., (1976) - Palynology of the middle part (30-78 metres) of the 120 m deep section in Northern Greece (Macedonia). *Acta Botanica Neerland.*, **25**, 1976, pp. 297-312.
- Williams D.F. et al., (1988) - Chronology of the Pleistocene isotope record : 0-1,88 my BP. *Palaeo*, **64**, 1988, pp. 221-240.
- Woillard G., (1978a) - Grande Pile Peat Bog : A continuous pollen record for the last 140 000 yrs. *Quatern. Res.*, **9**, 1978, pp. 1-21.
- Woillard G., (1978b) - Végétation et climat des derniers 140 000 ans dans la tourbière de la Grande Pile (N.E. France). *Palaecology of Africa*, **10**, 1978, pp. 125-134.
- Woillard G., (1979) - The last interglacial-glacial cycle at La Grande Pile in northeastern France. *Bull. Soc. Belge Géol.*, **88**, 1979, pp. 51-69.
- Woillard G., (1980) - The pollen record of Grande Pile (NE. France) and the climatic chronology through the last interglacial-glacial cycle. In J. Chaline : « *Problèmes de stratigraphie quaternaire en France et dans les pays limitrophes* », Suppl. au Bull. de l'AFEQ, 1980, pp. 95-103.
- Woillard G. et Mook W.G., (1982) - Carbon-14 dates at Grande Pile : correlation of land and sea chronologies. *Science*, **215**, 1982, pp. 159-161.