

UNE RECONSTITUTION DES CLIMATS DU DERNIER CYCLE CLIMATIQUE À PARTIR DES DIAGRAMMES POLLINIQUES. COMPARAISON AVEC LES DONNÉES OCÉANIQUES ET GLACIAIRES

1. 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 étendue (SHACKLETON 1967, 1987; SHACKLETON, OPDYKE 1973, 1976; VAN DONK 1976; SHACKLETON *et al.* 1983). Les recherches les plus récentes mettent finalement en évidence un mécanisme de fractionnement isotopique de l'oxygène un peu plus complexe (KRINNER *et al.* 1997; DAHL-JENSEN *et al.* 1998; SALAMATIN *et al.* 1998; PETIT *et al.* 1999; HOFFMANN *et al.* sous presse).

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, 1997¹), 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; CHAPPELLAZ *et al.* 1990, 1993; JOUZEL, LORIUS 1993; SOWERS *et al.* 1993; BASILE *et al.* 1997; PETIT *et al.* 1990, 1999). Les synthèses les plus récentes montrent une excellente corrélation entre les profils du Groenland, de l'Antarctique et les données océaniques (PUJOL, TURON 1986; BOND *et al.* 1993; BENDER *et al.* 1994; WAELBROECK *et al.* 1995; STEIG *et al.* 1998) et permettent de reconnaître, à l'intérieur de la séquence würmienne de GRIP-

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.

Summit, plusieurs oscillations tempérées, appelées événements de Dansgaard-Oeschger, numérotées de 1 à 24, et corrélées avec les principaux stratotypes continentaux² (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, KIPP 1971), l'analyse spectrale de longues séquences stratigraphiques (PISIAS *et al.* 1973; HAYS *et al.* 1976; BERGER *et al.* 1983, 1984, 1992; GOVAERTS *et al.* 1986; BERGER, LOUTRE 1992) et les techniques des séries chronologiques de G.E.P. Box et J.M. Jenkins (BOX, JENKINS 1970; BLASING 1978; HARREL, 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 (MILANKOVITCH 1938; HAYS *et al.* 1976; IMBRIE *et al.* 1984) 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; PISIAS *et al.* 1984; MARTINSON *et al.* 1987; WILLIAMS *et al.* 1988; IMBRIE 1992; MÖRNER 1992).

Dans le domaine de la palynologie, les premières approches quantitatives font appel à la notion de "fonction de transfert" (WEBB, BRYSON 1972; SACHS *et al.* 1977). 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, PRENTICE 1986; GUIOT *et al.* 1987; PRENTICE *et al.* 1992, 1996). Constatant les faiblesses et les limites des reconstructions antérieures (postulats de base discutables³ – 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 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; PONS *et al.* 1992; PEYRON *et al.* 1998). Une analyse comparative de ces résultats avec ceux obtenus par nous-mêmes sera entreprise dans la suite de cet exposé (cfr. *infra*).

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.

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; LABEYRIE 1984; DJINDJIAN 1991; PONS *et al.* 1992; GUIOT *et al.* 1992, 1993, 1999, 2000; MISKOVSKY, GIBERT 1993; PEYRON *et al.* 1998).

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 (BOSELIN, DJINDJIAN 2002). 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 dernier cycle climatique, 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 Eemiens 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.

2. LES SÉQUENCES POLLINIQUES DE TOURBIÈRES

2.1 *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 quantitative-

ment 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 (BOSELLIN, DJINDJIAN 2002):

- 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(sent) un gradient de température, un gradient d'humidité, ou les deux simultanément, permettant la construction de courbes paléoclimatiques relatives.

2.2 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, 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 Fig. 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,

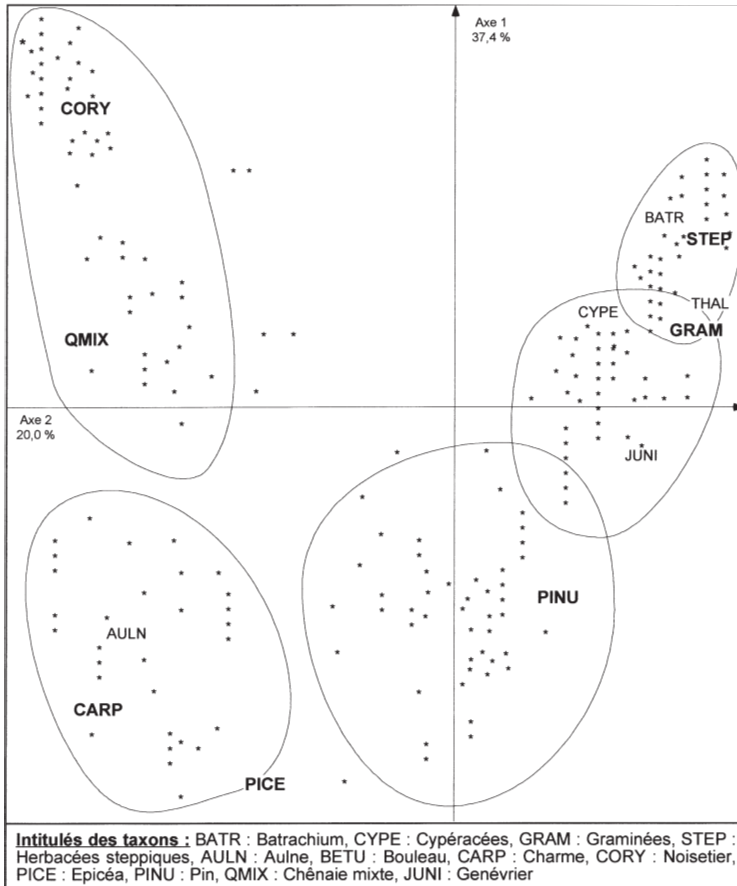


Fig. 1 – Le dernier cycle climatique à la tourbière de La Grande Pile (carottes I, XIV et X). Gradient de température révélé par le plan factoriel 1-2 de l'Analyse des Correspondances (les variables responsables de la signification des axes sont figurées en gras).

- un ensemble mixte à pins et bouleaux dominants, avec quelques épicias, 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 épicias, 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).

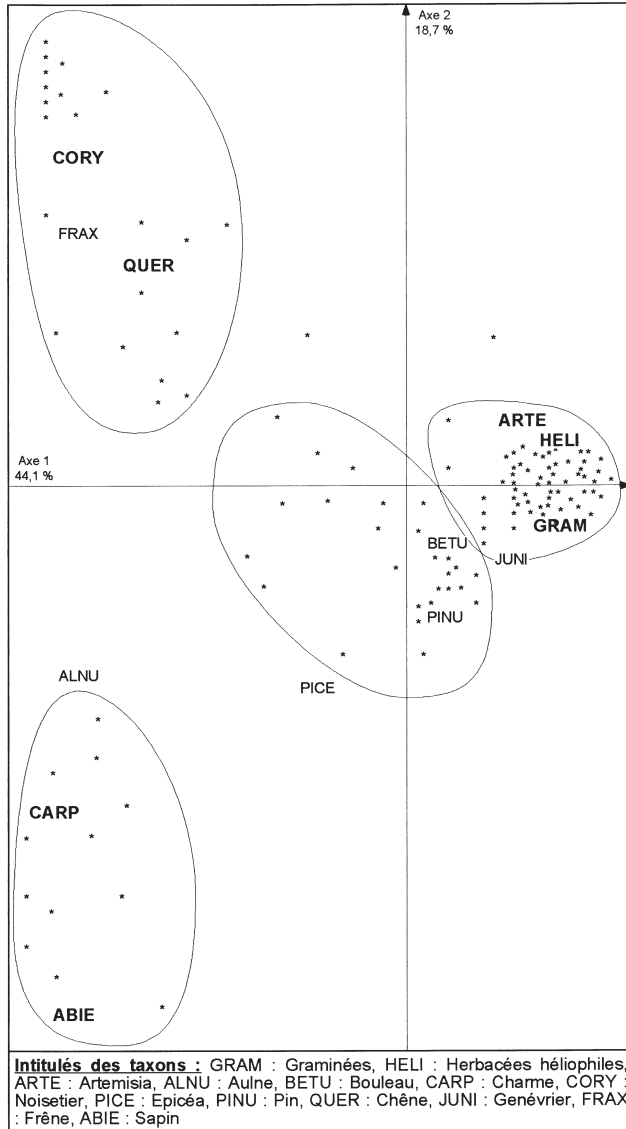


Fig. 2 – Le dernier cycle climatique à la tourbière de La Grande Pile (carotte XX). Gradient de température révélé par le plan factoriel 1-2 de l'Analyse des Correspondances (les variables responsables de la signification des axes sont figurées en gras).

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 méthodolo-

gie 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 Fig. 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).

2.3 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-Philippon⁴, 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 (WIJMSTRA 1969; WIJMSTRA, SMIT 1976; DE BEAULIEU, REILLE 1984a et b; PONS *et al.* 1992).

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

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.

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.

2.4 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 Fig. 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: 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

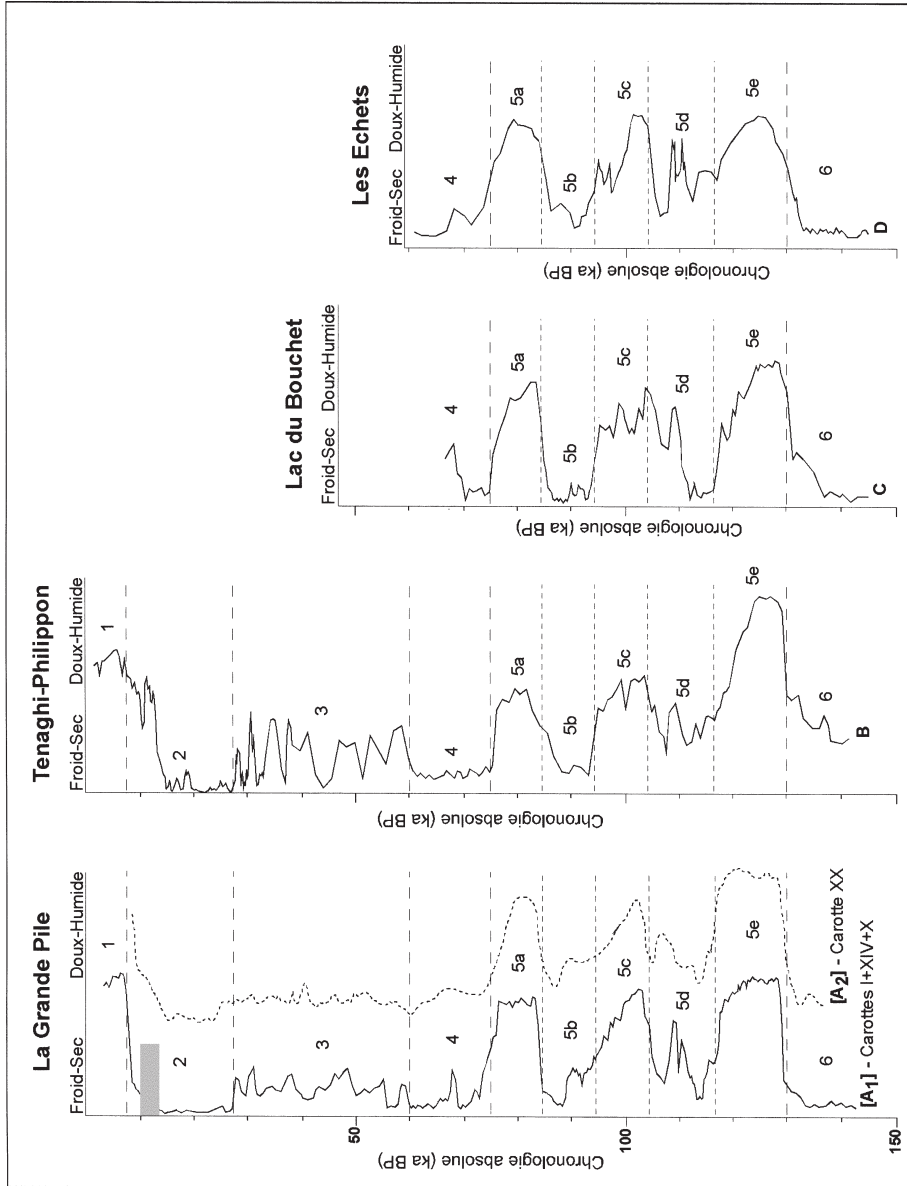


Fig. 3 – Courbes de paléotempérature relatives obtenues à partir du traitement statistique des diagrammes polliniques de tourbières couvrant le dernier cycle climatique. A₁: La Grande Pile, carottes I+XIV+X (ligne continue), A₂: La Grande Pile, carotte XX (ligne pointillée). B: Tenaghi-Philippon. C: Le Lac du Bouchet. D: Les Echets. Les lignes horizontales en tirets et en pointillés correspondent respectivement aux limites entre les stades isotopiques marins d’Emiliani et aux sous-stades du dernier interglaciaire (IS 5).

(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.

3. LE CADRE PALÉOCLIMATIQUE DU DERNIER CYCLE CLIMATIQUE

3.1 *Les analyses isotopiques des carottes océaniques et glaciaires*

La Fig. 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 (Fig. 4B) et des foraminifères benthiques de la carotte V 19-30 située dans le Pacifique (Fig. 4C), au profil $\delta^{18}\text{O}$ de la carotte de GRIP-Summit au Groenland (Fig. 4D), aux écarts de température par rapport à l'actuel déduits de la teneur en Deutérium du sondage de Vostok en Antarctique (Fig. 4E) et aux variations de la fréquence des foraminifères *N. Pachyderma* (*s.*) du site DSDP 609 situé dans l'Atlantique nord (Fig. 4F) (SHACKLETON 1967, 1987; SHACKLETON, OPDYKE 1973, 1976; SHACKLETON *et al.* 1983; PATERNE *et al.* 1984; BOND *et al.* 1993; DANSGAARD *et al.* 1993; JOUZEL, LORIUS 1993; SOWERS *et al.* 1993; JOHNSEN *et al.* 1995; PETT *et al.* 1999).

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 (cfr. *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 (PATERNE *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

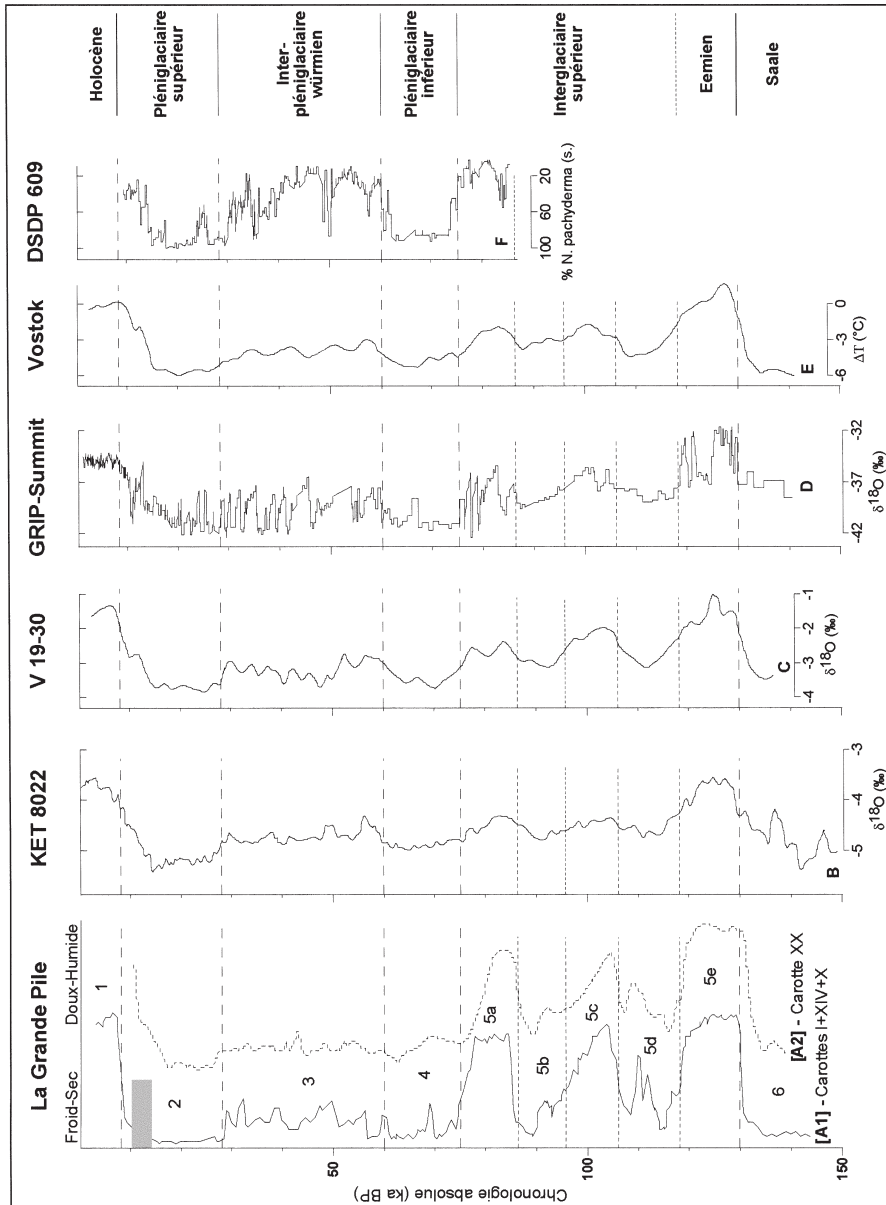


Fig. 4 – Corrélations entre les courbes de paléotempérature relatives (issues des diagrammes polliniques) et 5 carottes océaniques et glaciaires. A₁: Tourbière de La Grande Pile, carottes I+XIV+X (ligne continue). A₂: Tourbière de La Grande Pile, carotte XX (ligne pointillée). B: Variation du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères pélagiques (G. Bulloïdes) de la carotte KET 8022 (mer Tyrrhénienne). C: Analyse isotopique de l'oxygène des foraminifères benthiques de la carotte V 19-30 (océan Pacifique Est). D: Enregistrement du rapport $\delta^{18}\text{O}$ de la carotte de GRIP-Summit au Groenland. E: Courbe de température déduite des variations de la teneur en Deutérium dans la carotte glaciaire de Vostok (Antarctique). F: Variations de la fréquence des *N. Pachyderma s.* dans les sédiments de la carotte DSDP 609 (océan Atlantique nord). Les échelles chronologiques des carottes océaniques et glaciaires sont celles proposées dans les publications originales (voir texte et bibliographie). Les lignes horizontales en tirets et en pointillés correspondent respectivement aux limites entre les stades isotopiques marins d'Emiliani et aux sous-stades du dernier interglaciaire (IS 5). Sur la droite de la figure, est indiquée la division du dernier cycle climatique proposée ici, incluant la glaciation de Saale (IS 6) et l'Holocène (IS 1).

(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 (cfr. 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; CHAPPELLAZ *et al.* 1990, 1993; PETIT *et al.* 1990, 1999⁵; SOWERS *et al.* 1993; BASILE *et al.* 1997). 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, TURON 1986; WAELBROECK *et al.* 1995; TZEDAKIS *et al.* 1997; STEIG *et al.* 1998), 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 (BOSELIN, DJINDJIAN 2002).

3.2 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 *et al.* 1987, 1989, 1992, 1993, 1999, 2000; GUIOT 1990; PONS *et al.* 1992; PEYRON *et al.*

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).

1998). 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 Fig. 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 dernier cycle climatique 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 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.

3.3 *Le dernier cycle climatique: les oscillations climatiques et leur numérotation*

Le dernier cycle climatique 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 sim-

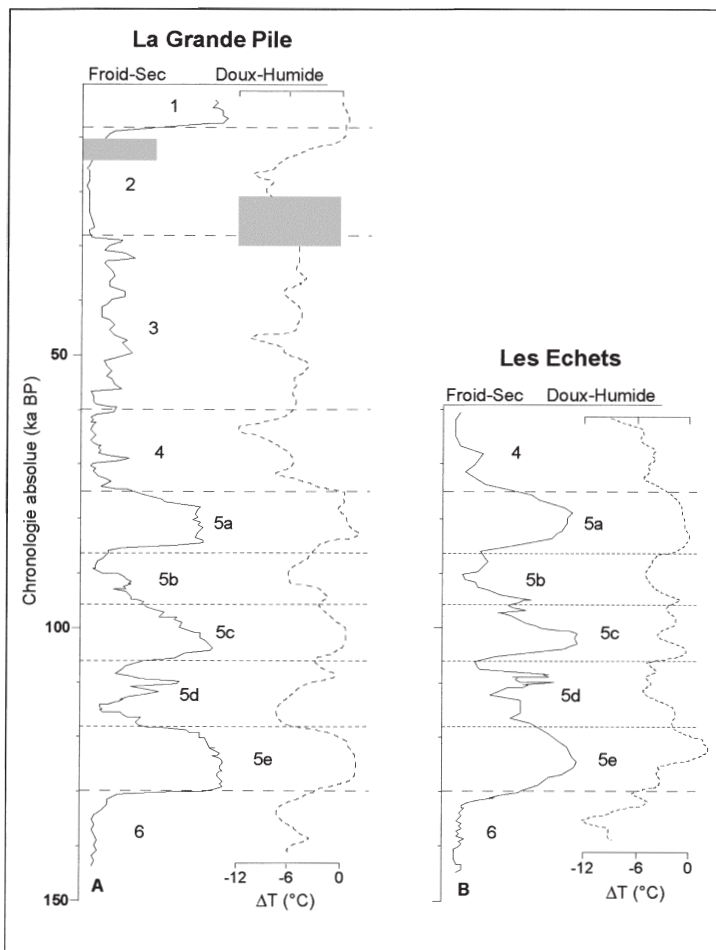


Fig. 5 – Comparaison des courbes de paléotempérature relatives déduites du traitement statistique des diagrammes polliniques (lignes continues) avec les reconstitutions quantitatives des températures annuelles de J. Guiot, exprimées en écart par rapport à l’actuel (lignes pointillées). A: La Grande Pile, carottes I+XIV+X. B: Les Echets.

ple représentation du taux de pollens d’arbres (cfr. *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, 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, DJINDJIAN 2002), 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 (Tab. 1).

Événements de Dansgaard-Oeschger	Dénomination pollinique historique	Numérotation B. Bosselin et F. Djindjian (2002)
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

Tab. 1

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

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

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 pléni-glaciaire 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) (CHAPPELLAZ *et al.* 1990, 1993; BEHRE, VAN DER PLICHT 1992; JOHNSEN *et al.* 1992; BOND *et al.* 1993; DANSGAARD *et al.* 1993; BENDER *et al.* 1994; FRONVAL *et al.* 1995; WEIßMÜLLER 1997).

La Fig. 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 (WIJMSTRA 1969; WIJMSTRA, SMIT 1976; WOILLARD 1978a et b, 1979, 1980), 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 (GRÜGER 1979; DE BEAULIEU, REILLE 1984a et b, 1992; GUIOT *et al.* 1992). 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 dans le stade isotopique 4; Ognon I et II correspondant aux rémissions climatiques (événements de Dansgaard-Oeschger n° 20 et 19) historiquement connues sous les termes de "Oerel" et "Glindo", renumérotées ici 7b et 7a, et Ognon III à une simple harmonique lors de la dynamique de refroidissement des climats à la fin du dernier interglaciaire⁷. Cela nous permet en outre

⁷ Une discussion détaillée sur la position chronologique de ces oscillations est disponible dans: DUPLESSY *et al.* 1976; WOILLARD 1978a et b, 1979, 1980; DE BEAULIEU, REILLE 1984a et b, 1992.

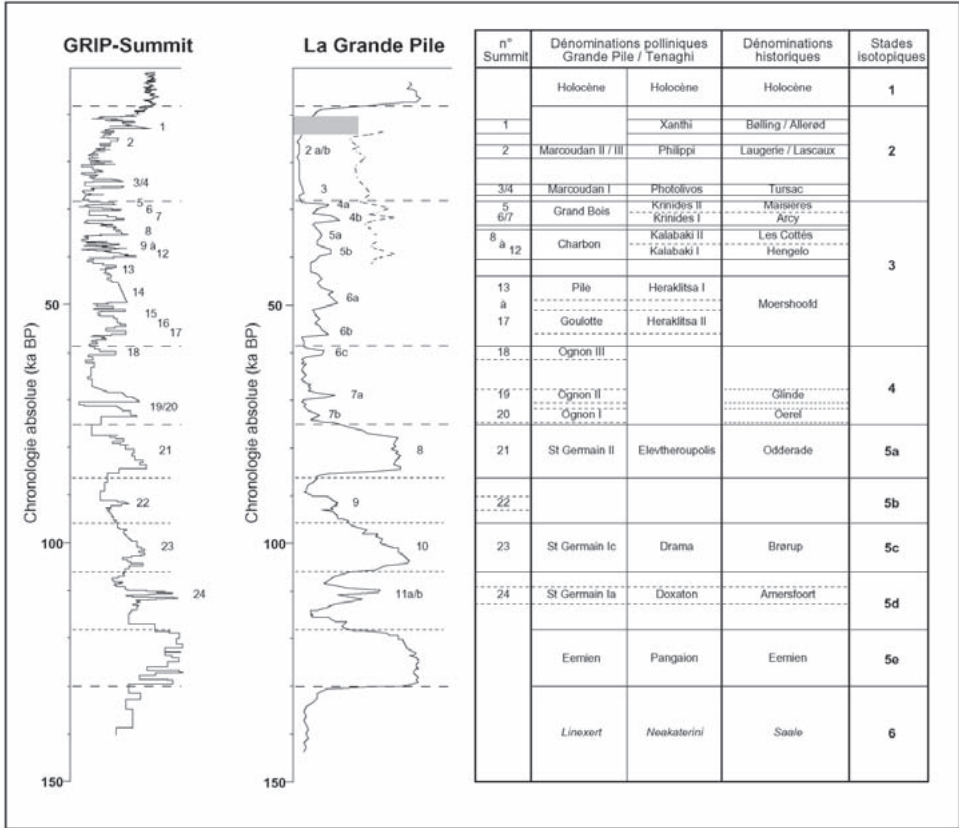


Fig. 6 – Le cadre paléoclimatique du dernier cycle climatique: comparaison des systèmes de numérotation des oscillations climatiques et corrélations inter-régionales. Dans la carotte de GRIP-Summit, la numérotation des oscillations climatiques correspond aux événements de Dansgaard-Oeschger (DANSGAARD *et al.* 1993; WEISSMÜLLER 1997). A La Grande Pile, la numérotation des oscillations climatiques correspond à l’extension du système précédemment proposé (BOSSELIN, DJINDJIAN 2002). Les échelles des temps ont été compressée ou dilatée pour rendre les corrélations plus évidentes, en accord avec les positions chronologiques des oscillations climatiques du dernier interglaciaire.

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 (DANSGAARD *et al.* 1993; CORTIJO *et al.* 1994; MASLIN 1996; JOHNSEN

et al. 1997; WEIßMÜLLER 1997). Contradictoirement 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 (Fig. 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.

4. 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 Fig. 7a. La classification ascendante hiérarchique,

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.).

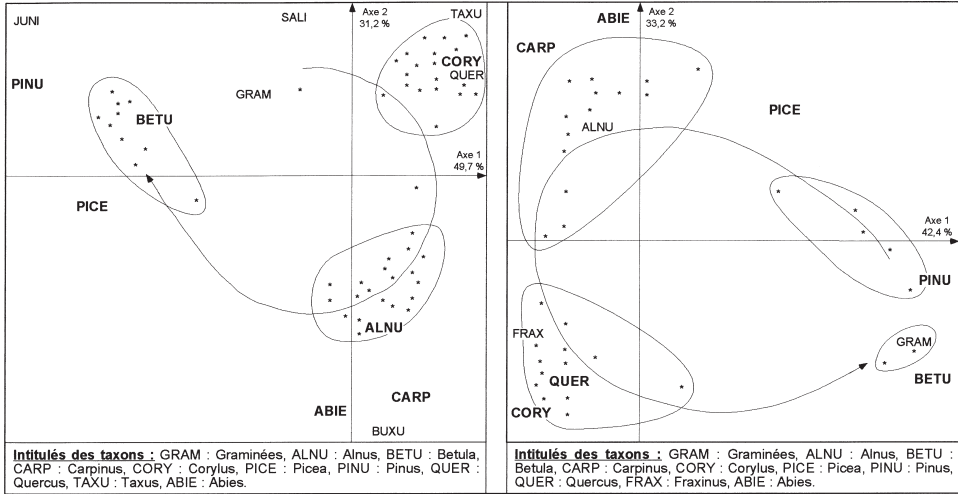


Fig. 7 – L'Eemien à la tourbière de La Grande Pile. Faciès de végétation forestière révélés par le plan factoriel 1-2 de l'Analyse des Correspondances. A gauche: carotte X, à droite: carotte XX (les variables responsables de la signification des axes sont figurées en gras).

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%) 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 Fig. 7b. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les 3 premiers axes, met en 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 végéta-

tion 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 (TURNER, WEST 1968 in WOILLARD 1979; DE BEAULIEU, SUC 1985).

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 (chêne mixte et noisetier), réduction compensée par le développement du charme, puis du sapin et de l'épicéa¹⁰. 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; DANSGAARD *et al.* 1993; CORTIJO *et al.* 1994; 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.

5. CONCLUSION

Les carottes océaniques (océan Pacifique, mer Méditerranée, océan Atlantique nord), les carottes glaciaires (Groenland et Antarctique) et les lon-

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 (WEGMÜLLER 1966; DE BEAULIEU *et al.* 1988; REILLE, DE BEAULIEU 1988; RUFFALDI 1991).

gues séquences polliniques de tourbières (la Grande Pile, Tenaghi-Philippon, 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 dernier cycle climatique.

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 antérieures 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.

BRUNO BOSSELIN

BIBLIOGRAPHIE

- BARNOLA J.M. *et al.* 1987, *Vostok ice core provides 160,000 years record of atmospheric CO₂*, «Nature», 329 (1990), 408-414.
- BARTLEIN P.J., PRENTICE I.C. 1986, *Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American taxa*, «Journal of Biogeography», 13, 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 Planetary Science Letters», 146, 573-589.
- BEAULIEU J.L. DE, REILLE M. 1984a, *A long upper Pleistocene pollen record from Les Echets, near Lyon (France)*, «Boreas», 13, 111-132.

- BEAULIEU J.L. DE, 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, 3-9.
- BEAULIEU J.L. DE, REILLE M. 1992, *The last climatic cycle at la Grande Pile (Vosges, France). A new pollen profile*, «Quaternary Science Reviews», 11, 431-438.
- BEAULIEU J.L. DE, SUC J.P. 1985, *Les pollens et l'histoire de la végétation*, in *Les climats de la préhistoire*, «Histoire et archéologie», 93, 67-73.
- BEAULIEU J.L. DE *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), 5-36.
- BEHRE K.E., 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, 111-117.
- BENDER M. *et al.* 1994, *Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100,000 years*, «Nature», 372, 663-666.
- BERGER A., LOUTRE M.F. 1992, *Astronomical solutions for palaeoclimatic studies over the last 3 million years*, «Earth Planetary Science Letters», 111, 369-382.
- BERGER A. *et al.* 1983, *Approche astronomique des variations paléoclimatiques*, in *Paléoclimats. Actes du colloque AGSO*, Bordeaux, «Cahier du Quaternaire», numéro spécial, 7-26.
- BERGER A. *et al.* 1984, *Milankovitch and Climate*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- BERGER A. *et al.* 1992, *Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for palaeoclimatic studies*, «Science», 255, 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 Series 5, 213-228.
- BOND G. *et al.* 1993, *Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice*, «Nature», 365, 143-147.
- BOSSSELIN B., DJINDJIAN F. 2002, *Un essai de reconstitution du climat entre 40.000 BP et 10.000 BP à partir de séquences polliniques de tourbières et de carottes océaniques et glaciaires à haute résolution*, «Archeologia e Calcolatori», 13, 275-300.
- BOX G.E.P., JENKINS J.M. 1970, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, New York, Holden Day.
- CHAPPELLAZ J. *et al.* 1990, *Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years*, «Nature», 345, 127-131.
- CHAPPELLAZ J. *et al.* 1993, *Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP*, «Nature», 366, 443-445.
- CORTIJO E. *et al.* 1994, *Eemian cooling in the Norwegian Sea and North Atlantic ocean preceding ice-sheet growth*, «Nature», 372, 446-449.
- DAHL-JENSEN D. *et al.* 1998, *Past temperatures directly from the Greenland ice sheet*, «Science», 282, 268-271.
- DANSGAARD W. *et al.* 1993, *Evidence for general instability of the past climate from a 250-kyr ice-core record*, «Nature», 364, 218-220.
- DJINDJIAN F. 1991, *Méthodes pour l'archéologie*, Paris, Armand Colin.
- DUPLESSY J.Cl. *et al.* 1976, *Paléoclimatologie des temps quaternaires à l'aide des méthodes nucléaires*, in *La Préhistoire Française*, vol. I,1, 352-361.
- EMILIANI C. 1955, *Pleistocene temperatures*, «Journal of Geology», 63, 538-578.
- FRONVAL T. *et al.* 1995, *Oceanic evidence for coherent fluctuations in Fennoscandian and Laurentide ice sheets on millennium timescales*, «Nature», 374, 443-446.
- GOVAERTS Y. *et al.* 1986, *Analyse du comportement climatique en fréquence et en phase pour le dernier cycle glaciaire-interglaciaire*, «Bulletin de l'AFEQ», 25-26, 7-16.

- GROOTES P.M. *et al.* 1993, *Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland Ice Cores*, «Nature», 366, 552-554.
- GRÜGER E. 1979, *Spättriss, Riss/Würm und Frühwürm am Samerberg in Oberbayern. Ein Vegetationsgeschichtlicher Beitrag zur Gliederung des Jundpleistozäns*, «Geologica bavarica», 80, 5-64.
- GUIOT J. 1990, *Methodology of the last climatic cycle reconstruction in French from pollen data*, «Palaeogeography, Palaeoclimate, Palaeoecology», 80, 49-69.
- GUIOT J. *et al.* 1987, *Late quaternary climatic change in France estimated from multivariate pollen time series*, «Quaternary Research», 28, 1987, 100-118.
- GUIOT J. *et al.* 1989, *A 140,000 year continental climate reconstruction from two European pollen records*, «Nature», 338, 309-313.
- GUIOT J. *et al.* 1992, *Calibration of the climatic signal in a new pollen sequence from La Grande Pile*, «Climate Dynamics», 6, 259-264.
- GUIOT J. *et al.* 1993, *The climate in Western Europe during the last Glacial/Interglacial cycle derived from pollen and insect remains*, «Palaeogeography, Palaeoclimate, Palaeoecology», 103, 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), 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, 119-140.
- HARRELL J., BRISKIN M. 1980, *Time series analysis of the Pleistocene deep-sea palaeoclimatic records using periodic regression*, «Marine Geology», 36, 1-22.
- HAYS J. *et al.* 1976, *Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages*, «Science», 194, 1121-1132.
- HOFFMANN G. *et al.* (sous presse), *Stable water isotopes in atmospheric general circulation models*, «Hydrological Processes» (sous presse).
- IMBRIE J. 1992, *On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing*, «Palaeoceanography», 7, 701-738.
- IMBRIE J., KIPP N.G. 1971, *A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: Application to a late Pleistocene Caribbean core*, in K.K. TUREKIAN (ed.), *Late Cenozoic Glacial Ages*, New Haven, Yale University Press.
- 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*, vol. 1, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 269-305.
- JOHNSEN S.J. *et al.* 1992, *Irregular glacial interstadials in a new Greenland ice-core*, «Nature», 359, 311-313.
- JOHNSEN S.J. *et al.* 1995, *Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles*, «Tellus», 47B, 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*, «Journal of Geophysical Research», 102, 26397-26410.
- JOUZEL J., LORIUS CL. 1993, *Utilisation des isotopes stables de l'eau en climatologie et paléoclimatologie: l'exemple des glaces polaires*, in *Atome et Géologie*, «Mémoire de la Société Géologique Française», 162, 189-198.
- KRINNER G. *et al.* 1997, *GCM analysis of local influences on ice cored signals*, «Geophysical Research Letters», 24, 2825-2828.
- LABEYRIE L. 1984, *Le cadre paléoclimatique depuis 140 000 ans*, «L'Anthropologie», 88 (1), 19-48.

- MC KENNA T.E. *et al.* 1988, *Quantitative techniques in isotope chronostratigraphy*, «Palaeo», 64, 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*, «Quaternary Research», 7, 1-29.
- MASLIN M. 1996, *Intra-Eemian cold event*, «Terra Nova», 8, 5.
- MILANKOVITCH M. 1938, *Die Chronologie des Pleistozäns*, «Bulletin de l'Académie Nationale des Sciences Mathématiques», Belgrade, 4, 49.
- MISKOVSKY J.Cl., 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*, «Mémoire de la Société Géologique Française», 162, 71-84.
- MÖRNER N.A. 1992, *Sea-level changes and the earth's rate of rotation*, «Journal of Coastal Research», 8 (4), 966-971.
- PATERNE M. *et al.* 1984, *Variations climatiques en mer Tyrrhénienne depuis 140 000 ans*, in *Prépub. C.F.R.*, CNRS.
- PETIT J.R. *et al.* 1990, *Paleoclimatological implications of the Vostok core dust record*, «Nature», 343, 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, 429-436.
- PEYRON O. *et al.* 1998, *Climatic Reconstruction in Europe for 18,000 YR B.P. from Pollen Data*, «Quaternary Research», 49, 193-196.
- PISIAS N.G. *et al.* 1973, *Spectral analysis of late Pleistocene-Holocene sediments*, «Quaternary Research», 3, 3-9.
- PISIAS N.G. *et al.* 1984, *High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 30 000 years*, «Marine Geology», 56, 119-156.
- PONS A. *et al.* 1992, *Recent contributions to the climatology of the last glacial-interglacial cycle based on French pollen sequences*, «Quaternary Science Reviews», 11, 439-448.
- PRENTICE I.C. *et al.* 1992, *A global biome model based on plant physiology and dominance, soils properties and climates*, «Journal of Biogeography», 19, 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, 185-194.
- PUJOL C., TURON J.L. 1986, *Comparaison des cycles climatiques en domaines marin et continental entre 131 000 et 28 000 BP dans l'hémisphère nord*, «Bulletin de l'AFEQ», 25-26 (1/2), 17-25.
- REILLE M., 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, 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), 137-149.
- SACHS H.M. *et al.* 1977, *Paleoecological transfert functions*, «Annual Review of Earth and Planetary Science», 5, 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)*, «Journal of Geophysical Research», 103, 8963-8977.
- SHACKLETON N.C. 1967, *Oxygen isotope analysis and Pleistocene temperature reassessed*, «Nature», 215, 15-17.
- SHACKLETON N.C. 1987, *Oxygen isotopes, ice volume and sea level*, «Quaternary Research», 6, 183-190.

- SHACKLETON N.J., OPDYKE N.D. 1973, *Oxygen isotopes and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V 28-238: Oxygen isotopes temperatures and ice volumes on a 10⁵ and 10⁶ years scale*, «Quaternary Research», 3, 39-55.
- SHACKLETON N.J., OPDYKE N.D. 1976, *Oxygen isotopes and Paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V 28-239 late Pliocene to latest Pleistocene*, in R.M. CLINE, J.D. HAYS (eds.), *Investigation of late Quaternary paleogeography and paleontology*, Geological Society of America. Memoirs 145, 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 Planetary Science Letters», 65, 233-244.
- SOWERS T. et al. 1993, *135 000 years Vostok-SPECMAP common temporal framework*, «Palaeoceanography», 8, 737-766.
- STEIG E. et al. 1998, *Synchronous climatic changes in Antarctica and the North Atlantic*, «Science», 282, 92-95.
- TZEDAKIS P.C. et al. 1997, *Comparison of terrestrial and marine records of changing climate of the last 500,000 years*, «Earth Planetary Science Letters», 150, 171-176.
- UREY H.C. 1947, *The Thermodynamic properties of isotopic substances*, «Journal of Chemical Society», 562-581.
- VAN DONK J. 1976, *$\delta^{18}\text{O}$ record of the Atlantic Ocean for the entire Pleistocene Epoch*, in R.M. CHINE, J.D. HAYS (eds.), *Investigation of Late Quaternary paleogeography and paleontology*, Geological Society of America. Memoirs, 145, 147-163.
- WAELEBROECK 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, 113-123.
- WEBB III T., 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*, «Quaternary Research», 2, 70-115.
- WEGMÜLLER S. 1966, *Über die spät- und Postglaziale Vegetationsgeschichte des südwestlichen Jura*, Berne, Verlag Hans Hüber.
- 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, 89-111.
- WIJMSTRA T.A. 1969, *Palynology of the first 30 meters of a 120 m deep section in northern Greece*, «Acta Botanica Neerlandica», 18 (4), 511-527.
- WIJMSTRA T.A., SMIT A. 1976, *Palynology of the middle part (30-78 metres) of the 120 m deep section in Northern Greece (Macedonia)*, «Acta Botanica Neerlandica», 25, 297-312.
- WILLIAMS D.F. et al. 1988, *Chronology of the Pleistocene isotope record: 0-1,88 my BP*, «Palaeo», 64, 221-240.
- WOILLARD G. 1978a, *Grande Pile Peat Bog: A continuous pollen record for the last 140 000 years*, «Quaternary Research», 9, 1-21.
- WOILLARD G. 1978b, *Végétation et climat des derniers 140 000 ans dans la tourbière de la Grande Pile (N.E. France)*, «Palaeology of Africa», 10, 125-134.
- WOILLARD G. 1979, *The last interglacial-glacial cycle at La Grande Pile in northeastern France*, «Bulletin de la Société Belge de Géologie», 88, 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*, Supplément au Bulletin de l'AFEQ, 95-103.
- WOILLARD G., MOOK W.G. 1982, *Carbon-14 dates at Grande Pile: Correlation of land and sea chronologies*, «Science», 215, 159-161.

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 Paleoclimates. 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 structuralization of the last climatic cycle in four periods: the interglacial Riss/Würm including the optimum Eemian, the lower pleniglacial, the Würmian 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. A final statistical treatment shows a cyclic evolution of the forest vegetation during the Eemian, an evolution which better translates the variations of the Paleoclimates (temperature and humidity) than the arboreal pollen rate (AP).