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.

Bruno Bosselin, François Djindjian

▶ **To cite this version:**

Bruno Bosselin, François Djindjian. 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.. "Data Management and Mathematical Methods in Archaeology" - Actes du XIV° Congress of the International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences, 2001, Liège, Belgique. pp.275-300. hal-00201616

HAL Id: hal-00201616
https://hal.science/hal-00201616

Submitted on 14 Jan 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

XIV CONGRESS OF THE INTERNATIONAL UNION
OF PREHISTORIC AND PROTOHISTORIC SCIENCES

(LIEGE - BELGIUM - SEPTEMBER 2001)

XIV CONGRES DE L'UNION INTERNATIONALE
DES SCIENCES PREHISTORIQUES ET PROTOHISTORIQUES

(LIEGE - BELGIQUE - SEPTEMBRE 2001)

COMMISSION IV

Data Management and Mathematical Methods in Archaeology
Proceedings of Symposia 1.3, 1.5, 1.8, 1.10

Edited by
François Djindjian and Paola Moscati

with
George L. Cowgill, Frank Vermeulen and Albertus Voorrips

ESTRATTO

ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI
13
2002

ALL'INSEGNA DEL GIGLIO

Archeologia e Calcolatori
13, 2002, 275-300

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

1. Introduction

Depuis les années 50, la connaissance du climat du dernier million d'années a fait l'objet de progrès considérables, grâce à l'étude de longues séquences issues de carottages profonds dans les mers et les océans, dans les banquises, dans les dépôts loessiques ou dans les tourbières.

Si la théorie de M. Milankovitch (Milankovitch 1941) a pu être vérifiée puis affinée par des modèles astronomiques toujours plus précis (Berger 1983, 1984; Hay, Imbrie, Shackleton 1976), l'objet des recherches des paléoclimaticiens est autant la reconstitution du climat dans le passé le plus lointain possible qu'une prévision fine dans le futur des évolutions climatiques à l'échelle de la planète.

Face à cet enjeu stratégique, les besoins des archéologues paraissent plus modestes: obtenir un cadre paléoclimatique précis et fiable sur leurs périodes d'études, permettant d'analyser les interactions et les adaptations de l'homme à ces changements d'environnement.

La question se pose avec d'autant plus d'acuité pour la période 40.000 BP-10.000 BP (stades isotopiques 2 et 3) qui correspond à l'époque que les préhistoriens appellent le Paléolithique supérieur. Dans cette période en effet, l'abondance des sites stratifiés, l'étude des remplissages sédimentaires et les datations ^{14}C de plus en plus fiables et nombreuses permettent d'obtenir un cadre chronologique suivant les différentes étapes de peuplement de l'homme en Europe, avec une précision de l'ordre de 1000 ans environ.

Il est donc indispensable de pouvoir construire des courbes de variations du climat (température et précipitations) avec la même précision. Or, jusqu'à présent, les climatologues semblent ne pas s'être suffisamment intéressés à la période 40.000 BP-10.000 BP, avec une résolution suffisamment fine pour atteindre le niveau de précision attendu par les archéologues. De nombreuses questions posées sont ainsi restées sans réponse, en particulier la corrélation entre les variations en latitude des peuplements et les variations climatiques pendant cette période, ainsi que la validité des différents épisodes climatiques, non pas sur la seule palynologie du remplissage des abris-sous-roche, mais sur l'ensemble des méthodes d'analyse et des types de sédimentation disponibles (notamment les tourbières et les séquences de loess avec sols fossiles).

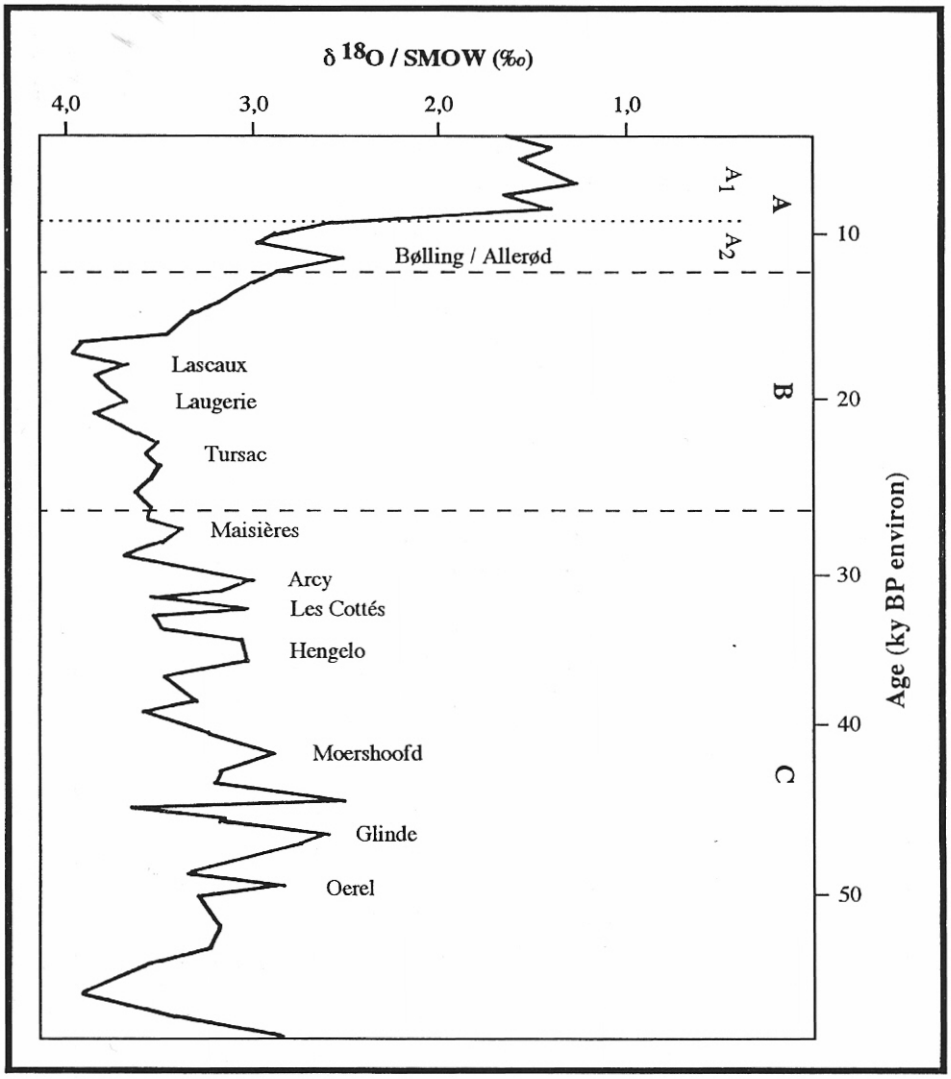

Fig. 1 – Courbe isotopique δ ^{18}O mesurée sur les foraminifères planctoniques (G. Bulloïdes) de la carotte KET 8004 située en mer Tyrrhénienne (d'après Labeyrie 1984; Paterne *et al.* 1984).

2. Les enregistrements des carottes océaniques et glaciaires

Parmi les nombreux enregistrements issus des carottages océaniques et glaciaires, la présente étude a recherché ceux qui possèdent une résolution suffisamment fine pour ne pas lisser les événements climatiques mineurs con-

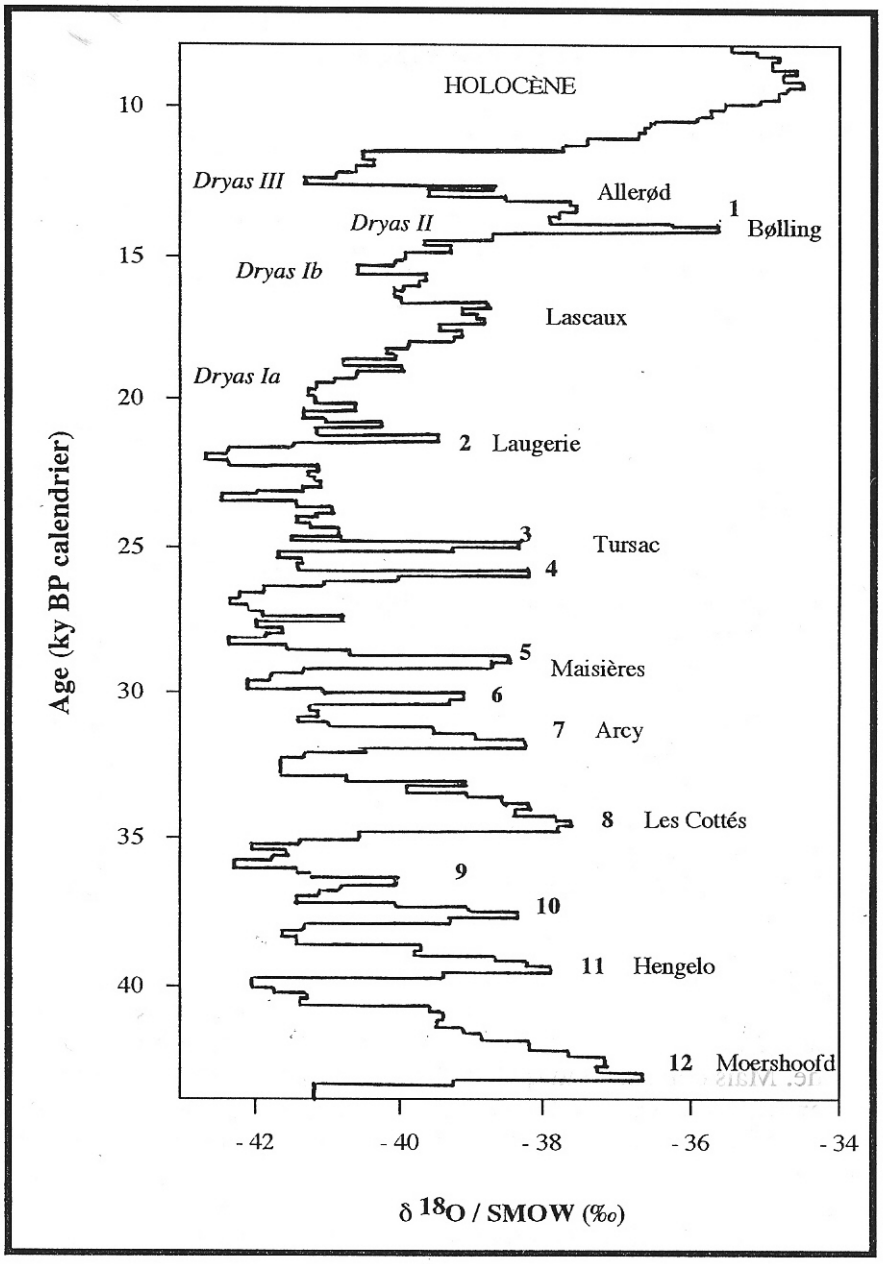

Fig. 2 – Profil isotopique δ ^{18}O mesuré sur la carotte glaciaire de Summit au Groenland. Les numéros de pics correspondent à la nomenclature des événements de Dansgaard-Oeschger; les dénominations à notre interprétation de la séquence.

nus dans la période 40.000 BP-10.000 BP. D'autres possèdent des lacunes ou sont insuffisamment datés et étalonnés. Seuls quelques-uns d'entre eux répondent donc à ce critère et permettent d'aborder la question posée, avec cependant des résolutions variables.

Le premier enregistrement pris en compte est la carotte KET 8004 (PATERNE *et al.* 1984) provenant de la mer Tyrrhénienne. La courbe représentant les variations du rapport $^{18}O/^{16}O$, malgré un pas d'échantillonnage parfois trop large pour autoriser une résolution élevée, révèle des oscillations climatiques de faible durée et de faible amplitude, organisées en trois périodes. La Fig. 1 met en correspondance les pics de ces oscillations avec des noms d'épisodes climatiques souvent utilisés dans la littérature par les archéologues, et issus de séquences de tourbières, de remplissages d'abris-sous-roche et de sols fossiles issus de stratigraphies loessiques (cf. *infra*).

Le second enregistrement sélectionné est la carotte de GRIP-Summit au Groenland (DANSGAARD *et al.* 1993). Cette courbe isotopique, à la résolution plus fine, met en évidence des oscillations climatiques pour la plupart déjà visibles dans l'enregistrement précédent. La Fig. 2 présente les variations du rapport $^{18}O/^{16}O$ de cette carotte et une numérotation des oscillations climatiques proposée par les glaciologues, en référence aux stratotypes continentaux. Sur cet enregistrement, comme sur le précédent, la plupart des oscillations reconnues correspondent à des épisodes climatiques déjà identifiés dans la littérature, issus d'enregistrements polliniques de tourbières (Allerød, Bølling, Hengelo, Moershooft) ou de sols fossiles de séquences de loess (Denekamp, Stillfried B, Bohunice, Maisières, Pavlov, etc.), malgré des noms que la postérité a retenu et qui proviennent d'abris ou de grottes dont la validité éponyme reste à confirmer (Lascaux, Laugerie, Tursac, Arcy, Les Cottés). Pour un bibliographie plus précise et plus exhaustive, on pourra se référer à F. Djindjian *et al.* ainsi qu'à W. Weißmüller (DJINDJIAN, OTTE, KOZLOWSKI 1999, II, §2; WEIßMÜLLER 1997).

Le nombre des oscillations rencontrées dans les sondages glaciaires est supérieur au nombre des oscillations habituellement reconnues dans la littérature dans d'autres types de prélèvements, comme par exemple les carottes océaniques (cf. *supra*), les séquences loessiques et les remplissages d'abris-sous-roche. Mais comme l'indique P.M. Grootes (GROOTES 1993, 554) à propos des enregistrements GRIP et GISP2: «The large number of interstadials revealed by the ice cores may be the cause of some confusion about the numbers of interstadials and their timing in northwest European climate records and offer an opportunity for their interpretation».

L'interprétation de ces oscillations peut en effet faire l'objet de conclusions radicalement opposées:

– Soit il s'agit de variations aléatoires, correspondant à un bruit du signal climatique, sans signification particulière. C'est l'opinion en particulier de J. Guiot,

M. Reille, J.L. de Beaulieu et A. Pons (Guiot *et al.* 1992) qui considèrent, à propos de l'enregistrement de la Grande Pile, ces épisodes comme trop courts et trop faibles pour être à l'origine d'un changement de la végétation.

– Soit il s'agit d'artefacts de mesure ou d'interprétation des données, comme cela a été invoqué pour la plupart des interstades polliniques de remplissages d'abris-sous-roche ou de grottes, notamment par M.F. Sanchez-Goni (Sanchez-Goni 1994, 1996, 1999).

– Soit il s'agit d'épisodes réels, stables dans le temps et en amplitude. Dans ce cas, ils ont pu ne pas être décelés dans d'autres enregistrements et par d'autres méthodes, que l'on peut retrouver et comparer. Certes, ces épisodes peuvent ne pas être décelables dans certains types d'enregistrements, par certaines méthodes ou par certaines limites de précision d'acquisition, mais dans ce cas, leur absence d'enregistrement ne peut être exploitée comme la preuve de leur absence réelle.

C'est pourquoi, il est ici nécessaire de continuer la recherche d'autres enregistrements susceptibles de révéler les mêmes épisodes climatiques, aux mêmes dates, et de même amplitude, et pour commencer dans les séquences polliniques de tourbières.

3. Les séquences polliniques de tourbières

3.1 *Quelques problèmes de méthode*

Les dépôts continentaux de tourbières fournissent de longues séquences polliniques, dont les cortèges de taxons arboréens et herbacés peuvent être, dans certaines limites à connaître, de bons estimateurs pour la reconstitution des paléoclimats.

L'exploitation quantitative des cortèges de faune ou de flore à des fins de reconstitution climatique est devenu classique, depuis notamment les travaux de J. Imbrie et N.G. Kipp (Imbrie, Kipp 1971), qui ont établi des courbes de paléotempérature à partir de cortèges de foraminifères des sédiments extraits de carottes océaniques, en utilisant l'analyse en composantes principales sur des analogues modernes, puis par une régression factorielle des cortèges fossiles. M. Roux a comparé cette méthode avec l'utilisation d'une analyse des correspondances (Roux 1979).

La propriété que possède l'analyse des données de mettre en évidence un gradient de température n'a pas échappé à de nombreux chercheurs dans les années 70: par exemple, F. Blanc, L. Blanc-Vernet *et al.* sur des foraminifères, Ph. Vilette sur des oiseaux, B. Laurin et D.D. Rousseau sur des associations malacologiques, C. Denys et F. Djindjian dans J.Cl. Marquet sur des rongeurs, F. Gasse sur des diatomées, B. Molfino, N.G. Kipp et J.J. Morley sur des radiolaires et des coccolithophoridés (Blanc *et al.* 1972; Denys 1985;

DJINDJIAN dans MARQUET 1989; GASSE *et al.* 1979; LAURIN, ROUSSEAU 1985; MOLFINO *et al.* 1982; VILETTE 1984). Les pollens ont également fait l'objet de calcul de fonctions de transfert (BIRKS, GORDON 1985) pour des reconstitutions climatiques.

Dans certains cas, au gradient thermique (température) s'ajoute d'autres gradients comme la salinité (IMBRIE, KIPP 1971) ou l'hygrométrie (LAURIN, ROUSSEAU 1985, déjà cité).

Ces méthodes peuvent être améliorées mathématiquement comme dans toute approche de traitement du signal. Ainsi J. Guiot (GUIOT 1987, 1990) a proposé une méthode basée sur le traitement multidimensionnel de séries chronologiques, utilisant les techniques de Box et Jenkins et l'analyse des données, aboutissant au calcul d'un estimateur paleobioclimatique PBO décrivant les variations climatiques (cf. *infra*).

Un débat particulièrement important découle du choix possible de deux stratégies différentes dans le traitement des données:

– La première consiste à réunir un vaste échantillon de cortèges actuels (les analogues) avec des mesures réelles associées (température, précipitations, etc.), ce qui permettra d'en déduire les valeurs correspondantes pour les cortèges fossiles, après traitement statistique approprié. Cette démarche, intellectuellement plus satisfaisante, suppose cependant que les cortèges actuels représentent en quelque sorte un ensemble de toutes les différentes catégories climatiques possibles, desquelles les cortèges fossiles vont pouvoir se rapprocher le plus. En fait, même si l'échantillon était parfaitement représentatif, les biozones actuelles ne sont pas un sur-ensemble des biozones du passé, et donc l'ajustement d'un cortège fossile se fera sur le cortège actuel le plus proche, mais pas le meilleur. La fonction de transfert sera mathématiquement la plus satisfaisante, mais le résultat ne sera pas forcément juste.

– La seconde approche consiste à ne pas considérer les cortèges actuels mais à traiter directement le tableau (cortèges fossiles x espèces) pour espérer faire apparaître des gradients dont l'interprétation climatique est donnée par la signification climatique des ensembles d'espèces qui caractérisent les axes factoriels. Le gradient n'est pas étalonné comme dans l'approche précédente, mais la reconstitution s'effectue sur une structure fossile réelle et non pas actuelle.

Pour avoir utilisé les deux approches sur de nombreux exemples, en particulier pour l'un d'entre nous sur les rongeurs (F. DJINDJIAN dans J.CL. MARQUET 1989), notre préférence pratique va à la seconde approche.

Concernant plus particulièrement les données polliniques, la seconde approche met en évidence deux gradients climatiques sur les axes factoriels les plus proches. J. Guiot (GUIOT 1987, 1990; GUIOT *et al.* 1989, 1992; PEYRON *et al.* 1998; PONS *et al.* 1992) a également interprété deux «Paleo-Bioclimatic

Component» de sa méthode en tant que gradients de température et d'humidité. Cet auteur met en effet en évidence sur le PBC 1 une opposition entre d'une part les taxons mésothermophiles (*Corylus*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Tilia*,...), et d'autre part les taxons non arboréens (*Poacées*, *Artemisia*, *Chenopodiacées*) ou de la forêt boréale (*Pinus*, *Betula*), opposition qui «révèle des conditions climatiques plus ou moins tempérées» (Pons *et al.* 1992, 440) et «est suffisant(e) pour décrire les principaux changements climatiques» (Guiot 1990, 58). Complémentairement, il reconnaît le pin comme une essence de la forêt boréale, traduisant une augmentation de l'humidité en milieu froid, et en opposition avec l'ensemble *Artemisia*/*Chenopodiacées* plus sec (Guiot *et al.* 1992, 263).

Notre approche quantitative par analyse factorielle des correspondances et classification ascendante hiérarchique (cf. *infra*) confirme la généricité des gradients climatiques mis en évidence par J. Guiot, quelque soit la situation géo-topographique des séquences polliniques analysées: opposition entre les taxons thermophiles (*Corylus*, *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*) et les herbacées de lande et/ou de steppe (*Artemisia* et *Poacées*) pour le gradient de température mis en évidence sur le premier axe factoriel, et présence plus soutenue des espèces arborées pionnières (*Pinus*, *Betula*), en opposition aux herbacées steppiques (*Artemisia*, *Chenopodiacées*, *Batrachium*) ou de lande (*Poacées*), pour le gradient d'humidité mis en évidence sur le deuxième axe factoriel (pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux paragraphes 3.2, 3.3 et 3.4).

Cette approche permet d'abord de vérifier si les assemblages d'espèces sont un échantillon représentatif d'un point de vue botanique, ou si au contraire cet échantillon a pu être biaisé pour de multiples raisons (percolation, sur-représentation, sous-représentation, ...). Elle permet en outre de vérifier que, d'une séquence analysée à l'autre, les mêmes assemblages d'espèces caractérisent les mêmes gradients climatiques ou non. La question reste cependant posée: comment pouvoir étalonner et linéariser ces deux gradients par des projections d'analogues aux températures et aux précipitations connues sur les deux axes factoriels concernés sans retomber dans les inconvénients précédemment cités de l'emploi des analogues. La moins mauvaise réponse est d'essayer les deux approches et d'en comparer les résultats. C'est ce que nous ferons en comparant les résultats de la présente étude avec ceux de l'estimateur paléobioclimatique de J. Guiot (Guiot 1987, 1990).

3.2 *Un exemple d'application de la méthode: le diagramme de Tenaghi-Philippon*

Un exemple complet de la méthode utilisée est donné à partir du diagramme de Tenaghi-Philippon (Wijmstra 1969). Les prélèvements correspondant à la fin du Pléistocène supérieur et au début de l'Holocène, sur une

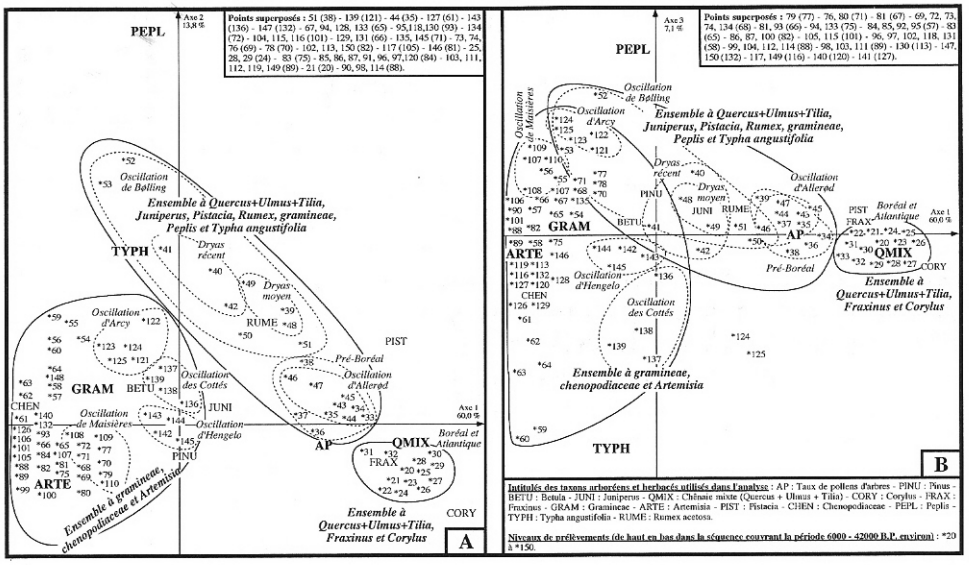

Fig. 3 – Tourbière de Tenaghi-Philippon (Macédoine, Grèce). Gradient de température et gradient d'humidité révélés par les plans factoriels 1-2 et 1-3 de l'Analyse des Correspondances (taux de pollens d'arbres inclus dans les variables descriptives). A. Plan factoriel 1-2 de l'Analyse des Correspondances (les variables responsables de la signification des axes sont figurées en gras). B. Plan factoriel 1-3 de l'Analyse des Correspondances (les variables responsables de la signification des axes sont figurées en gras).

durée comprise entre 40.000 BP et 6.000 BP environ, ont été retenus [1]. Une typologie relative et locale des taxons a alors été établie, en fonction des variations les plus significatives, en termes paléoclimatiques, rencontrées dans la séquence. Le tableau de fréquence ainsi constitué est traité par 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:

– interprétation des axes factoriels dont l'inertie dépasse 10 % de l'information initiale, par recherche des pollens responsables de leur signification et analyse des associations et des oppositions de taxons, traduisant des variations de température et/ou d'humidité,

– détermination des zonations polliniques, à partir des classes de la classification ascendante hiérarchique,

– interprétation paléoclimatique et chronologique, par calcul des courbes de paléotempérature et de paléohumidité relatives.

[1] Le sommet de la séquence révélant la déforestation anthropique de la fin de l'Atlantique et du début du Sub-Boréal, cette étude portera sur les prélèvements situés avant cette anthropisation.

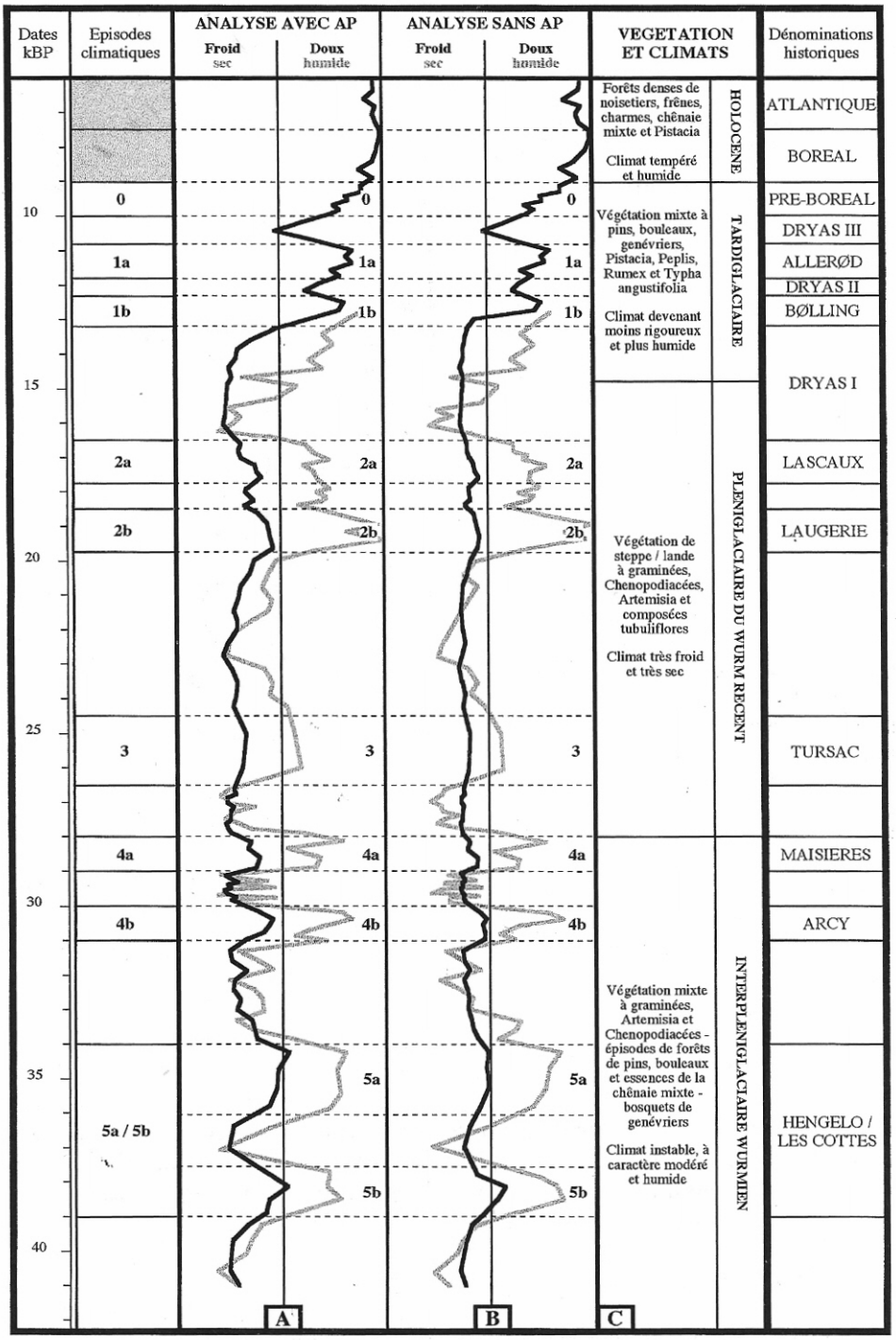

Fig. 4 – Tourbière de Tenaghi-Philippon (Macédoine, Grèce). Courbes paléoclimatiques obtenues à partir de la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel de l'Analyse des Correspondances. A. Analyse 1: taux de pollens d'arbres inclus dans les variables descriptives; B. Analysis 2: taux de pollen d'arbre exclus; C. Modélisation de la végétation et des climats entre environ 42.000 BP et 6.000 BP.

Le premier axe factoriel (72,6% d'inertie) oppose les noisetiers et les essences de la chênaie mixte (*Quercus, Ulmus et Tilia*) aux *Artemisia*. Il met en évidence un gradient de température, caractérisé par une opposition entre une végétation de steppe et un couvert forestier holocène. Le deuxième axe factoriel (7,7% d'inertie) oppose les pins, les noisetiers, les *Ostrya* et les *Artemisia* aux graminées. Le troisième axe factoriel enfin (7,5% d'inertie) oppose les *Chenopodiacées* et les *Artemisia* aux pins. Il met en évidence un gradient d'humidité. Les plans factoriels 1-2 et 1-3 sont présentés sur la Fig. 3. La classification ascendante hiérarchique, effectuée sur les trois premières coordonnées factorielles, met en évidence une zonation pollinique en trois classes:

– un ensemble à nombreuses graminées, *Chenopodiacées* et *Artemisia*, traduisant une végétation très ouverte de milieu très froid et sec,
– un ensemble mixte à essences de la chênaie mixte (*Quercus, Ulmus et Tilia*), genévriers, *Pistacia*, graminées, *Rumex*, *Peplis* et *Typha angustifolia*, traduisant une augmentation graduelle de l'humidité et de la température sur un substrat ouvert (climat froid-frais),
– enfin, un ensemble à noisetiers, frênes et essences de la chênaie mixte (*Quercus, Ulmus et Tilia*), traduisant une végétation forestière tempérée.

Les deux fonctions de transfert, construites à partir de l'analyse factorielle effectuée avec (Fig. 4A) ou sans (Fig. 4B) le taux de pollens d'arbres (AP) dans les variables descriptives, permettent de modéliser l'évolution de la végétation et du climat à Tenaghi-Philippon, de bas en haut dans la stratigraphie (Fig. 4C):

– Prélèvements 150 à 54: végétation ouverte à graminées, *Chenopodiacées*, *Artemisia* et composées tubuliflores. Au début, un climat instable voyant l'alternance d'oscillations froides et tempérées dans un contexte humide (prélèvements 150 à 107), correspondant à l'interpléniglaciaire würmien. A la fin, un froid très sec entrecoupé de quelques épisodes plus humides (prélèvements 106 à 54), correspondant au pléniglaciaire supérieur.

A *l'interpléniglaciaire würmien*, on distingue des pulsations plus douces et plus humides, à végétation mixte caractérisée par le développement des pins, des bouleaux, des genévriers et plus ponctuellement de la chênaie mixte, la réduction des graminées, des *Artemisia* et des *Chenopodiacées*: oscillations d'Hengelo (5b-cf. *infra* l'explication de la numérotation des oscillations climatiques), les Cottés (5a), Arcy (4b) et Maisières (4a).

Au cours du *pléniglaciaire supérieur*, on distingue des pulsations humides, mais faiblement marquées thermiquement, à végétation très ouverte caractérisée par l'accroissement modéré du pin et la faible réduction des steppiques: épisodes de Tursac (3), Laugerie (2b) et Lascaux (2a).

– Prélèvements 53 à 33 (sauf les prélèvements 42 à 40): végétation mixte à pins, bouleaux, genévriers, *Pistacia*, *Peplis*, *Rumex* et *Typha angustifolia*. Contexte climatique devenant moins rigoureux et plus humide, correspondant au Tardiglaciaire.

A l'intérieur de cet ensemble, on distingue trois phases successives correspondant aux oscillations tardiglaciaires Bølling et Allerød (resp. 1b et 1a), caractérisées par la croissance du pin, du bouleau et du genévrier, le fort développement de la chênaie mixte et la réduction massive des herbacées steppiques (graminées, *Artemisia* et *Chenopodiacées*); au retour du froid sec du Dryas récent; et enfin au Pré-Boréal (0) plus doux et plus humide, caractérisé par l'expansion du noisetier et de la chênaie mixte.

Une inflexion dans les courbes de transfert entre les oscillations de Bølling et Allerød, voyant la réduction de la chênaie mixte au profit des graminées, correspond au Dryas moyen, confirmant le caractère bref mais indiscutable de cette péjoration climatique.

– Prélèvements 32 à 20: végétation forestière dense à noisetiers, essences de la chênaie mixte (*Quercus*, *Ulmus* et *Tilia*), frênes, charmes-houblons et *Pistacia*. Contexte climatique tempéré et humide, correspondant au début de l'Holocène (Boréal et Atlantique ancien).

A Tenaghi-Philippon, la distinction entre le Boréal et l'Atlantique est visible sur des axes factoriels lointains, sur une opposition entre le noisetier et la chênaie mixte.

3.3 *Les données de la tourbière de la Grande Pile*

Cette méthodologie a ensuite été appliquée aux données de la tourbière de la Grande Pile (Woillard 1978a et b, 1979, 1980; Woillard, Mook 1982).

L'analyse factorielle des correspondances met en évidence un gradient de température (opposition *Quercus* - *Corylus*/Graminées) sur le premier axe factoriel et un gradient d'humidité (opposition *Betula* - *Pinus*/Graminées) sur le deuxième axe factoriel. La classification ascendante hiérarchique (méthode des voisins réductibles) conduit à une zonation pollinique en trois classes (analyses avec ou sans le taux de pollens d'arbres (AP) dans les variables descriptives):

– un ensemble à graminées, cypéracées, *Artemisia* et *Batrachium*, traduisant une végétation très ouverte de milieu très froid et sec,

– un ensemble à pins, bouleaux, genévriers, graminées, cypéracées et quelques *Artemisia*, traduisant une végétation ouverte/mixte de milieu froid mais plus humide,

– un ensemble à noisetiers, *Quercus*, *Ulmus* et *Tilia*, traduisant une végétation forestière tempérée.

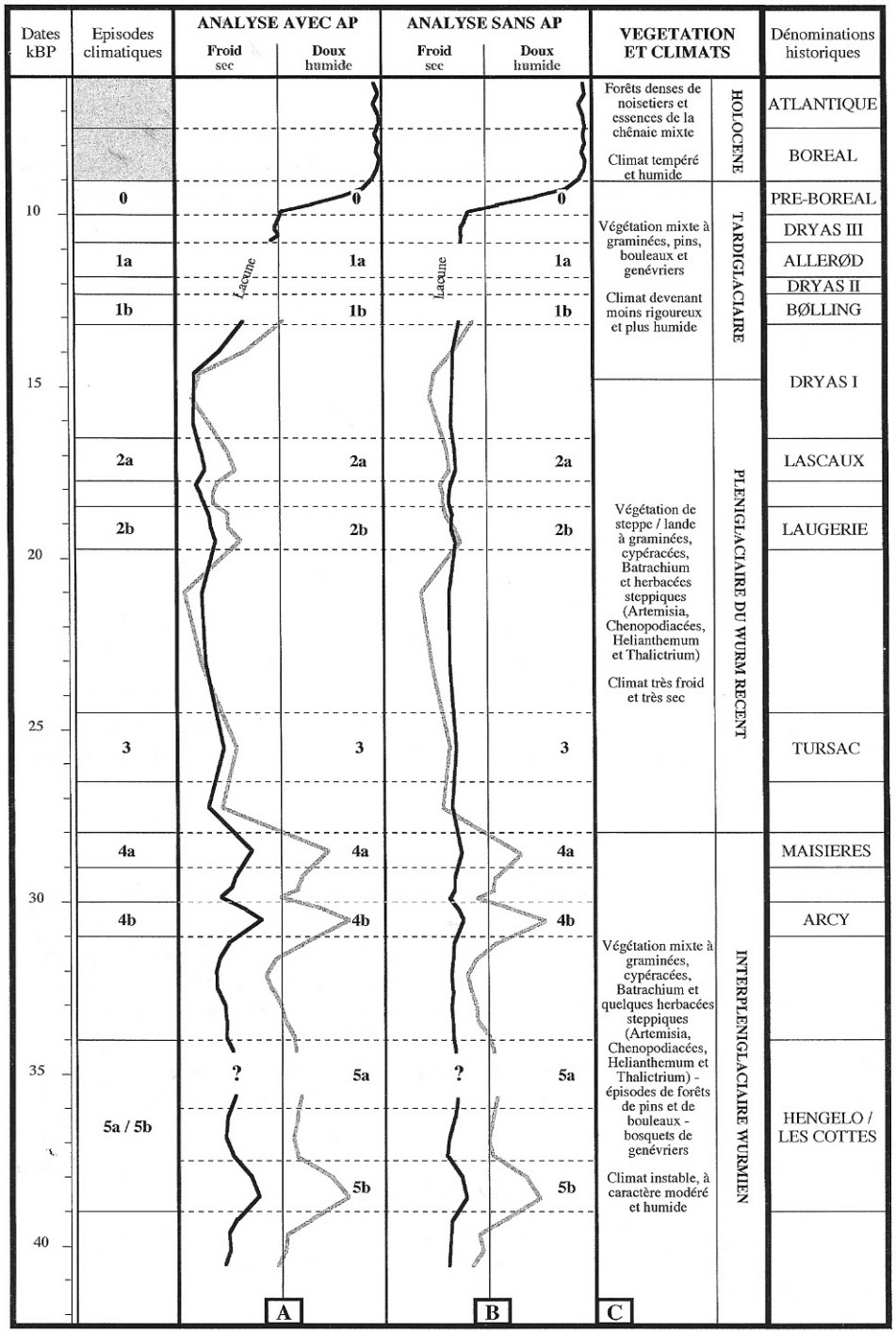

Fig. 5 – Tourbière de la Grande Pile (Vosges, France). Courbes paléoclimatiques obtenues à partir de la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel de l'Analyse des Correspondances. A. Analyse 1: taux de pollens d'arbres inclus dans les variables descriptives. Analysis; B. Analyse 2: taux de pollens d'arbres exclu des variables descriptives; C. Modélisation de la végétation et des climats entre environ 42.000 BP et 6.000 BP.

Les fonctions de transfert, obtenues par projection des prélèvements sur le premier axe factoriel, permettent de modéliser l'évolution de la végétation et des climats à la Grande Pile, de bas en haut dans la stratigraphie (Fig. 5):

– Prélèvements 68 à 45: végétation mixte à graminées, cypéracées, *Batrachium* et steppiques (*Artemisia*, *Chenopodiacées*, *Helianthemum* et *Thalictrium*); forêts de pins, bouleaux et quelques chênes; bosquets de genévriers. Contexte climatique instable, à caractère encore modéré et humide, correspondant à l'interpléniglaciaire würmien.

A l'intérieur de cet ensemble, on distingue des pulsations plus douces et humides, à végétation caractérisée par l'importance des genévriers, des pins, des bouleaux et des chênes, au détriment des steppiques: oscillations d'Hengelo/les Cottés (5b/5a), Arcy (4b) et Maisières (4a)[2].

– Prélèvements 44 à 28: végétation très ouverte à graminées, cypéracées, *Batrachium* et herbacées steppiques (*Artemisia*, *Chenopodiacées*, *Helianthemum* et *Thalictrium*). Contexte climatique très froid et sec, correspondant au pléniglaciaire supérieur.

A l'intérieur de cet ensemble, on notera le développement ponctuel[3] du *Potamogeton*, plante aquatique traduisant une pulsation plus humide qui, en accord avec les datations absolues, correspond à l'épisode de Laugerie (2b). De même, les épisodes de Lascaux et Tursac sont faiblement marqués thermiquement: augmentation limitée du taux de pollens d'arbres, essentiellement des pins, et faible réduction des steppiques, ce qui confirme le caractère froid de ces pulsations un peu plus humides (resp. 2a et 3).

– Prélèvements 27 à 22: végétation mixte à graminées, pins, bouleaux et genévriers. Contexte climatique devenant moins rigoureux et plus humide, correspondant au tardiglaciaire.

Malheureusement, l'existence d'un hiatus et la forte représentation du bouleau dans cette partie de la séquence empêchent de reconnaître indiscutablement l'articulation des différentes phases climatiques du tardiglaciaire (Bølling, Dryas moyen, Allerød, Dryas récent et Pré-Boréal).

– Prélèvements 21 à 9: végétation forestière dense à noisetiers et essences de la chênaie mixte (*Quercus*, *Ulmus* et *Tilia*). Contexte climatique tempéré et humide, correspondant au début de l'Holocène (Boréal et Atlantique ancien).

[2] A la Grande Pile, la distinction entre les deux oscillations 5a et 5b n'apparaît pas. Toutefois, la réduction des herbacées steppiques, au profit des graminées, des cypéracées et des genévriers dans le prélèvement 59, indique une inflexion pouvant révéler une lacune correspondant à l'optimum de l'une de ces pulsations.

[3] Corrélé avec une réduction sensible des *Batrachium* et des steppiques. Par ailleurs, le taux de pollens d'arbres et les essences thermophiles ne montrent aucune augmentation significative.

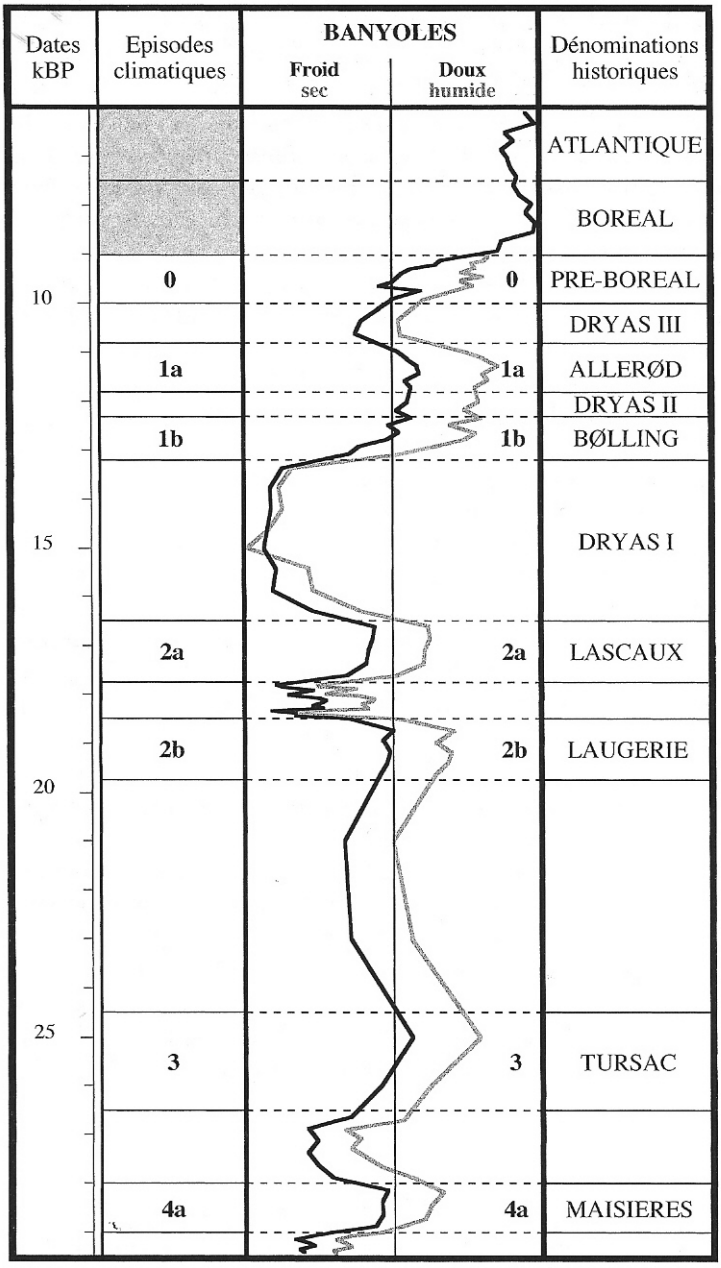

Fig. 6 – Tourbière de Banyoles (Catalogne, Espagne). Courbe paléoclimatique obtenue à partir de la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel de l'Analyse des Correspondances.

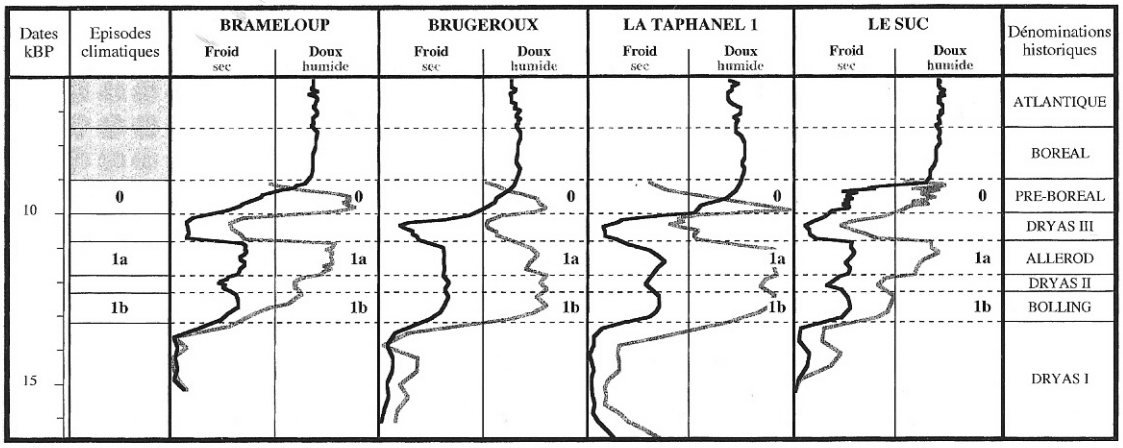

Fig. 7 – Tourbières de Brameloup, Brugeroux, la Taphanel 1 et le Suc (Massif Central, France). Courbes paléoclimatiques obtenues à partir de la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel de l'Analyse des Correspondances.

A la Grande Pile, la distinction entre le Boréal et l'Atlantique est visible sur un axe factoriel lointain, sur une opposition entre le noisetier et la chênaie mixte.

3.4 *Les données de la tourbière de Banyoles*

L'application de cette méthode aux données de la tourbière de Banyoles (Catalogne) conduit à une interprétation du premier axe factoriel en tant que gradient de température (opposition *Quercus-Corylus/Artemisia*) et du deuxième axe factoriel en tant que gradient d'humidité (opposition *Pinus/ Chenoposiacées-Artemisia*). La classification ascendante hiérarchique (méthode des voisins réductibles) conduit à une zonation pollinique en trois classes (Perez-Obiol, Julia 1994):

– un ensemble à *Chenopodiacées*, *Artemisia* et rares pins, traduisant une végétation très ouverte de milieu très froid et sec,

– un ensemble à graminées, pins, bouleaux et genévriers, traduisant une végétation mixte de milieu moins froid et plus humide,

– enfin, un ensemble à noisetiers et essences de la chênaie mixte (*Quercus, Ulmus et Tilia*), traduisant une végétation forestière tempérée.

La fonction de transfert, obtenue par projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel, permet, là encore, de modéliser l'évolution de la végétation et des climats à Banyoles (Fig. 6).

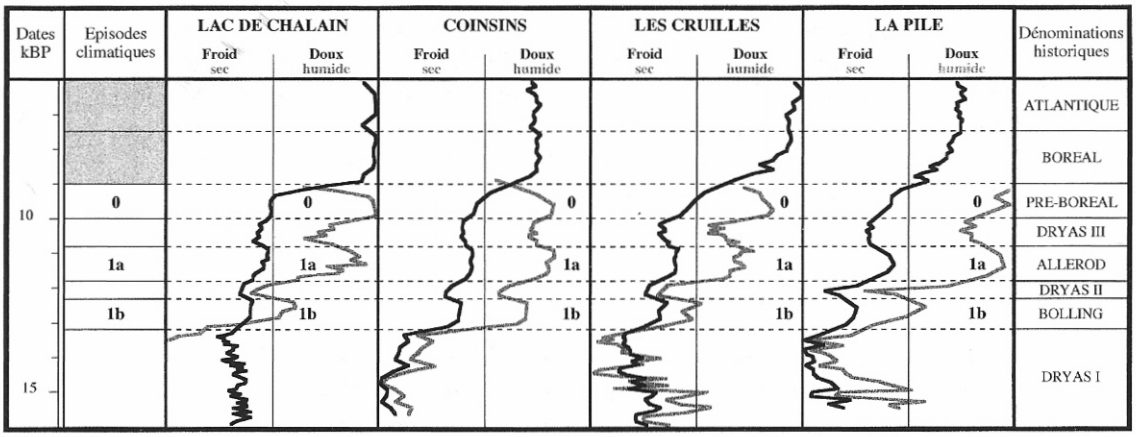

Fig. 8 – Tourbières de Coinsins, les Cruilles, lac de Chalain et la Pile (Jura, France). Courbes paléoclimatiques obtenues à partir de la projection des niveaux de prélèvements sur le premier axe factoriel de l'Analyse des Correspondances.

3.5 *Les autres séquences polliniques de tourbières et la dynamique de reforestation au cours du tardiglaciaire en milieu montagnard*

Les données disponibles dans le Massif Central (DE BEAULIEU, PONS, REILLE 1982, 1985, 1988; REILLE, DE BEAULIEU 1988, 1990; REILLE, DE BEAULIEU, PONS 1985) et l'arc alpin (AMMAN 1993; WEGMÜLLER 1966) ont été soumises au même traitement.

Les résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances permettent de reconnaître l'existence d'associations préférentielles de taxons, interprétables comme gradient de température sur le premier axe factoriel et comme gradient d'humidité sur le deuxième axe factoriel (cf. *supra*). Les Figs. 7 et 8 présentent les fonctions de transfert ainsi obtenues pour le Massif Central et le Jura.

D'un point de vue général, l'évolution de la végétation et des climats montre une réelle similarité entre ces différentes régions. En particulier, il est possible de confirmer l'existence des phases climatiques reconnues classiquement pour le tardiglaciaire et le début de l'Holocène. Ainsi, le Dryas ancien se caractérise par l'abondance des graminées, des cypéracées et des steppiques (*Artemisia*, *Chénopodiacées*, *Thalictrium* et *Helianthemum*), et la faible représentation de l'ensemble des arbres, constitués essentiellement de pins. La raréfaction progressive des indicateurs rigoureux, au profit des arbustes puis des arbres, suivant une succession genévrier/bouleau/pin, et l'existence d'une inflexion dans les fonctions de transfert permettent de distinguer les oscillations tardiglaciaires Bølling et Allerød, séparées par un Dryas moyen, très court mais bien visible. Cette dynamique de reforestation est ensuite temporairement interrompue par le coup de froid bref, mais bien marqué, du

Dryas récent, où les herbacées steppiques croissent de nouveau significativement. La fin du tardiglaciaire et le début de l'Holocène enfin, découpés en Pré-Boréal, Boréal et Atlantique ancien, se caractérisent par la disparition définitive des steppiques et la mise en place, en trois phases, d'un couvert forestier dense[5]: domination du pin lors du Pré-Boréal, du noisetier lors du Boréal et de la chênaie mixte lors de l'Atlantique ancien.

4. Le cadre paléoclimatique entre 40.000 BP et 10.000 BP: essai de reconstitution

4.1 *Le cadre paléoclimatique entre 40.000 BP et 10.000 BP: structuration interne*

L'interpléniglaciaire würmien (de 40.000 BP à 28.000 BP) se caractérise par un couvert forestier assez lâche, essentiellement composé de pins, de bouleaux et de genévriers, plus rarement d'essences thermophiles (noisetiers, chênes, ormes et tilleuls), et une végétation herbacée dominée par les graminées et les cypéracées, contenant parfois quelques plantes aquatiques (*Typha, Nymphéa*) et de rares steppiques (*Artemisia, Thalictrium, Helianthemum, Chenopodiacées*). À l'intérieur de cette séquence, les variations dans la composition de la flore sont suffisamment contrastées pour y reconnaître quatre oscillations à caractère tempéré et humide, numérotées ici 5b, 5a, 4b et 4a, caractérisées par l'accroissement du couvert forestier, dont des essences thermophiles, et identifiées historiquement de façon plus ou moins précise et sûre comme les oscillations de Hengelo/les Cottés, Arcy/Denekamp et Maisières.

La limite interpléniglaciaire/pléniglaciaire supérieur est fixée ici à 28.000 BP, à la fin de l'oscillation 4a (Maisières). Or, traditionnellement en Europe occidentale, cette limite est fixée vers 34.000 BP, au début du premier épisode froid particulièrement bien visible dans les séquences de remplissage d'abris-sous-roche, et qui suit l'oscillation dite des Cottés. Cependant en Europe centrale et orientale où les reconstitution paléoclimatiques sont basées sur des séquences de lœss, l'interpléniglaciaire est le plus souvent défini à partir d'une série de sols fossiles interpléniglaciaires dont la fin correspond à l'oscillation de Maisières, (Damblon, Hasaerts 1997; Hasaerts 1990; Hasaerts, Cahen 1997). Cette différence de délimitation est liée à la netteté des événements paléoclimatiques dans les enregistrements: épisodes froids dans les abris sous roche, sols fossiles dans les séquences lœssiques. Du seul point de vue de la netteté du signal paléoclimatique, la coupure à 28.000 BP semble préférable.

[5] Les résultats des traitements statistiques et les courbes de transfert obtenues à partir des coordonnées sur le premier axe factoriel indiquent par ailleurs très nettement une coupure entre les végétations du Pré-Boréal et du Boréal. Ceci pose la question d'attribuer le Pré-Boréal au tardiglaciaire (oscillation 0) et le Boréal au tout début de l'Holocène.

Dates BP	CHRONOLOGIE CLIMATIQUE			n° Dansgaard Oeschger	TENAGHI-PHILIPPON		LA GRANDE PILE		NORD-OUEST / JURA / SUISSE	
7500	HOLOCENE	-	**ATLANTIQUE**	-	HOLOCENE / POSTGLACIAL	Atlantique	HOLOCENE	Atlantique	HOLOCENE / POSTGLACIAL	6 / 7 : Atlantique
9000		-	**BOREAL**	-		Boreal		Boreal		5 : Boreal
10000	TARDIGLACIAIRE	**0**	PRE-BOREAL	-		Pre-Boreal		Pre-Boreal		4 : Pre-Boreal
10800		-	Dryas récent	Dryas récent	LATE GLACIAL	Younger Dryas	LANTERNE 3	LATE GLACIAL ?	LATE WURMIAN / TARDIGLACIAL	3 : Younger Dryas
11800		**1a**	ALLEROD	1		XANTHI				2 : ALLEROD INTERSTADIAL
12200		-	Dryas moyen							1c : Older Dryas
13300		**1b**	BOLLING							1b : BOLLING INTERSTADIAL
16500	PLENIGLACIAIRE	-	Dryas ancien	-	UPPER PLENIGLACIAL	-		Stadial 4		1a : Oldest Dryas
17800		**2a**	**Lascaux**	inter 1/2				MARCOUDAN 3		
18500		-		-		PHILIPPI		Stadial 3		
19700		**2b**	**Laugerie**	2				MARCOUDAN 2		
24500		-	-	-		-		Stadial 2		
26500		**3**	**Tursac**	3/4		PHOTOLIVOS		MARCOUDAN 1		
28000		-	-	-		-		Stadial 1		
29000	INTERPLENIGLACIAIRE	**4a**	MAISIERES	5	INTERPLENIGLACIAL	KRINIDES 2	LANTERNE 2	GRAND BOIS C		
30000		-	-	à		-		Grand Bois B		
31000		**4b**	ARCY	7		KRINIDES 1		GRAND BOIS A		
34000		-	-	-		-		Stadial 4		
36000		**5a**	LES COTTES	8		KALABAKI 2		CHARBON		
37500			Instabilité	à		-				
39000		**5b**	HENGELO	12		KALABAKI 1				
		-	-	-		-		Stadial 3		

Fig. 9 – Le cadre paléoclimatique du Würm récent et du début de l'Holocène : corrélations inter-régionales et reconstitution synthétique déduite de l'analyse des séquences polliniques. Les interglaciaires [ou interstades] au climat actuel ou sub-actuel sont indiqués en **Majuscule Gras**, les oscillations douces et humides en **Majuscule**, les oscillations froides et humides en **Minuscule Gras** et les phases froides et sèches en **Minuscule**.

Le pléniglaciaire supérieur ou ***pléniglaciaire du Würm récent*** (de 28.000 BP à 13.500 BP) se caractérise par un couvert forestier réduit à essentiellement quelques pins et bouleaux, et une strate herbacée dominée par les graminées, les cypéracées et les plantes steppiques: *Artemisia, Chenopodiacées, Thalictrium et Helianthemum*. À l'intérieur de cette séquence, trois oscilla-

tions numérotées 3, 2b et 2a se singularisent par le développement modéré des pins et des bouleaux, la réduction quoique faible des steppiques et l'apparition irrégulière en tourbières d'herbacées aquatiques (*Potamogeton* et *Sparganium*). Elles sont marquées par une amplitude thermique limitée et une remontée importante de l'humidité. Elles sont connues historiquement sous le nom d'oscillations de Tursac, Laugerie et Lascaux, et ont été attribuées à tort à des interstades climatiques d'importance variable.

Le tardiglaciaire (de 13.500 BP à 10.000 BP), groupant les oscillations Bølling, Allerød et Pré-Boréal numérotées 1b, 1a et 0, entrecoupées par les deux coups de froid inégaux du Dryas moyen et récent, se caractérise par un couvert forestier assez lâche composé de pins, bouleaux et genévriers, mais progressant rapidement sur un substrat de lande ou de steppe à graminées, cypéracées et *Artemisia*. Une inflexion est visible entre le Bølling et l'Allerød, ce qui permet de confirmer l'existence et la brièveté du Dryas moyen, parfois contesté. Cette dynamique de reforestation est ensuite brutalement interrompue par le retour de conditions froides et sèches (Dryas récent) bien marqué dans les diagrammes polliniques. Enfin, l'importance du pin et la rareté des essences thermophiles (noisetier et chênaie mixte) séparent nettement le Pré-Boréal du Boréal, caractérisé par la supériorité du noisetier sur le pin et la disparition des herbacées (graminées, cypéracées et steppiques). Enfin, la distinction entre le Boréal et l'Atlantique ancien s'effectue, lorsqu'elle est visible, au croisement des courbes du noisetier et de la chênaie mixte.

4.2 *La question des interstades et des oscillations et leur numérotation dans la séquence würmienne*

L'analyse des séquences polliniques issues de tourbières et des fonctions de transfert qui en découlent confirme l'existence, en accord avec les résultats des carottes océaniques et glaciaires, d'une partition du Würm récent en trois phases: l'interpléniglaciaire würmien, avec une alternance rapide d'oscillations tempérées ou froides dans un contexte humide; le pléniglaciaire du Würm récent, très froid et très sec; et le tardiglaciaire, caractérisé par un réchauffement progressif du climat dans un milieu devenant de plus en plus humide[6].

Entre 10.000 BP et 40.000 BP, plusieurs oscillations ont été distinguées, numérotées de haut en bas dans la stratigraphie suivant un référentiel nouveau, inspiré de celui établi par les glaciologues (Dansgaard *et al.* 1993; Johnsen 1992; Weißmüller 1997).

[6] En outre, le tardiglaciaire est suivi par l'Holocène, qui voit l'établissement de conditions climatiques proches de l'actuel, dès le Boréal.

Quelques différences apparaissent entre ce nouveau système de numérotation et celui des glaciologues. La résolution plus fine des courbes isotopiques des carottes glaciaires autorise en effet la reconnaissance d'événements climatiques de plus faible amplitude et/ou de plus faible durée[7].

Une des conclusions de cette étude est qu'il est abusif de vouloir nier en bloc la présence d'oscillations au cours du Würm récent[8]. La concordance entre les résultats obtenus à partir de l'étude quantitative des longues séquences polliniques prises en compte ici et ceux issus de l'analyse isotopique des carottes océaniques et glaciaires permet de confirmer le caractère oscillatoire de l'évolution des climats pour la période située entre environ 40.000 BP et 10.000 BP et de reconnaître l'existence de pulsations tempérées et humides pour l'interpléniglaciaire et le tardiglaciaire, et sans doute seulement plus humides pour le pléniglaciaire, allant ainsi à l'encontre des récentes conclusions de M.F. Sanchez-Goni[9].

La Fig. 9 propose un tableau de correspondance résumant le cadre paléoclimatique du Würm récent et du début de l'Holocène pour l'ensemble de l'Europe occidentale et méditerranéenne et un système de numérotation des oscillations climatiques qui abandonne les dénominations interstadiaires historiques, dont la fiabilité et la précision sur les sites éponymes restent à valider.

4.3 *Influence de l'altitude et de la latitude sur la végétation au cours du tardiglaciaire*

À la fin du pléniglaciaire du Würm récent, au cours du Dryas ancien entre environ 15.000 BP et 12.500 BP, des espèces spécifiques se développent, de façon singulière, suivant les régions: abondance des *Ranunculus type Batrachium* dans le Massif Central et, dans une moindre mesure le Jura et

[7] En particulier sur un exemple, l'épisode de Tursac apparaît double pour les sondages glaciaires et les diagrammes polliniques issue de sites anthropiques, d'amplitude chronologique réduite. Pour les longues séquences de pollens issues de tourbières par contre, il apparaît simple.

[8] Tout comme la négation de l'existence du Dryas moyen dont le refroidissement, bref et moderé, est nettement visible dans les séquences polliniques analysées sur les Figs. 7 et 8.

[9] M.F. Sanchez-Goni introduit une distinction entre les interstades et les interglaciaires, sur la base de leur durée et de leur amplitude relative, ces événements se caractérisant en outre par le développement d'une «végétation pionnière» en trois phases: *Juniperus / Betula / Pinus*. Elle soutient par ailleurs l'absence de réchauffement visible entre 25.000 et 10.000 BP dans les diagrammes polliniques et constate que les oscillations d'Hengelo, les Cottés, Arcy et «Kesselt» ne sont pas corrélables avec les pulsations déduites des séquences de référence (océaniques et glaciaires?). En conclusion à ses travaux, elle réfute la validité de l'ensemble des sites éponymes qui, d'après elle, souffrent d'un manque de représentativité et propose d'abandonner le système des interstades, qui ne peut plus être retenu comme significatif de l'évolution des climats du Würm récent (SANCHEZ-GONI 1994, 1996, 1999).

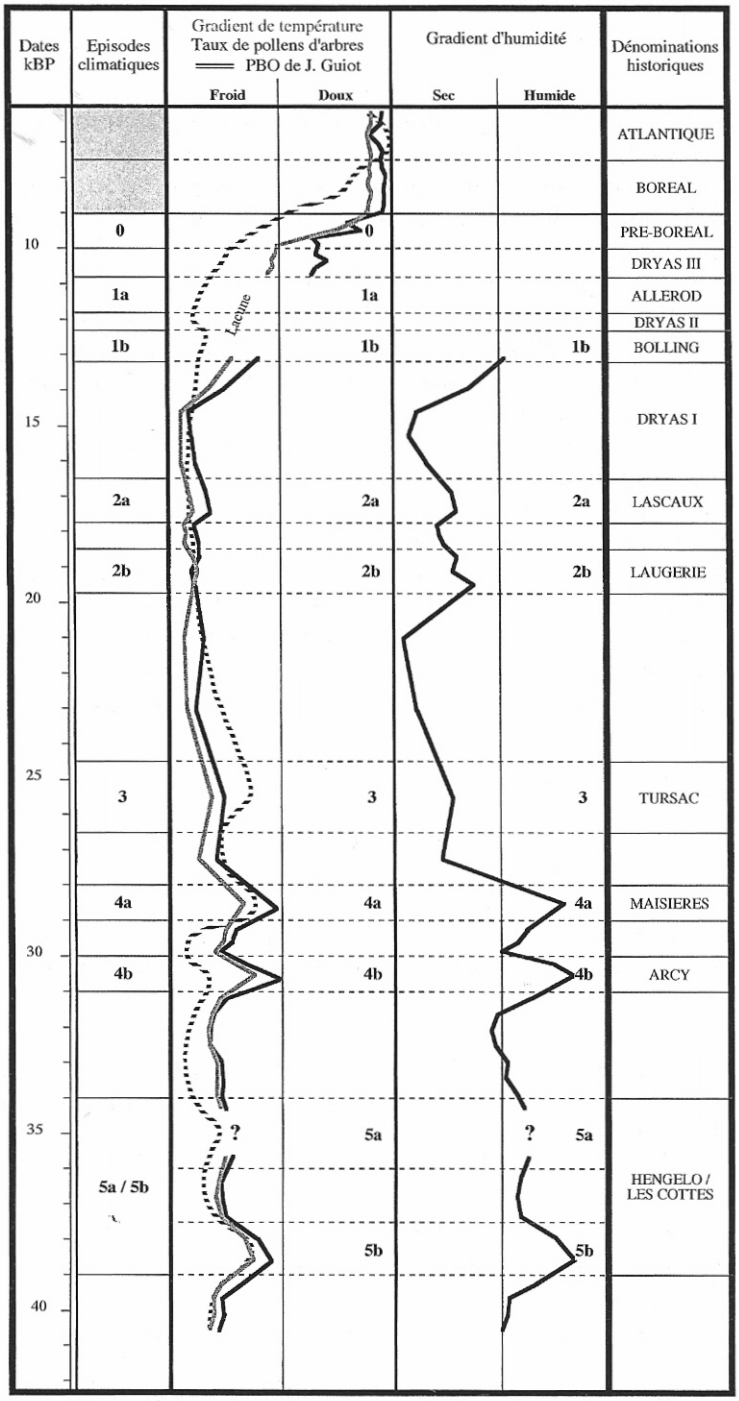

Fig. 10 – Variations du taux de pollens d'arbres (AP), de l'opérateur paléobioclimatique (PBO) et courbe de paléotempérature déduite de l'Analyse des Correspondances: comparaison des résultats obtenus pour la tourbière de la Grande Pile.

les Pyrénées, liée à l'existence d'eaux froides issues de la fonte des neiges et des glaces; fréquence élevée des *Helianthemum* et des *Chenopodiacées* dans l'arc alpin, liée à un environnement montagnard amplifiant les phénomènes périglaciaires et retardant les effets visibles de la déglaciation sur la végétation.

Dans les tourbières situées à des latitudes basses par contre (Catalogne, Sud de l'Espagne, piémont des Pyrénées et Grèce), l'abondance des espèces aquatiques (*Typha* et *Nymphéa*) au début du tardiglaciaire, le développement précoce du chêne dès les oscillations de Bølling et Allerød, lié à une dynamique de reforestation plus rapide dans ces régions, et la rareté ou l'absence du noisetier à l'interface tardiglaciaire/holocène, liée à une plus grande sécheresse du climat, sont également visibles.

En conclusion, la reforestation de la végétation au cours du tardiglaciaire est plus lente aux hautes latitudes, comme dans les environnements montagnards, ces deux situations expliquant une réponse non linéaire de la végétation aux variations des climats. Cet effet d'inertie est à l'origine de l'existence apparente de décalages chronologiques régionaux. Une analyse plus fine des données disponibles permettrait vraisemblablement de mettre en évidence le synchronisme des variations climatiques au cours du tardiglaciaire pour l'ensemble de l'Europe occidentale et méditerranéenne.

5. Le cadre paléoclimatique de la période 40.000 BP-10.000 BP. Comparaison avec les constructions antérieures

J. Guiot, se basant fort justement sur le fait que le taux de pollens d'arbres (AP) rassemble des taxons dont la signification climatique est différente, a proposé une méthode de reconstitution quantitative des paléoclimats basée sur la construction d'un indicateur paléobioclimatique à l'aide de techniques mathématiques particulièrement évoluées (Guiot *et al.* 1989) pour remplacer la courbe AP/NAP. Cette méthode, appliquée aux tourbières des Echets et de la Grande Pile, lui permet de modéliser les variations relatives de la température, par rapport à l'actuel. Il souligne ainsi que son «opérateur paléobioclimatique» (PBO) s'ajuste mieux avec les courbes isotopiques que les fluctuations du taux de pollens d'arbres (AP). Il en tire également la règle climatique générale que tout réchauffement du climat est précédé d'une augmentation de l'humidité, et que tout refroidissement du climat est précédé d'un accroissement de la sécheresse.

La courbe du PBO et la fonction de transfert de température montrent une grande similitude, confirmant l'intérêt des deux approches. Quelques différences apparaissent cependant, vraisemblablement due à un effet de lissage de la courbe du PBO, dans l'amplitude relative des pulsations de

l'interpléniglaciaire würmien (Fig. 10). Pour J. Guiot, l'oscillation de Maisières et l'épisode de Tursac apparaissent relativement marquées, au contraire des oscillations d'Arcy et les Cottés plus faibles[10].

6. Conclusions

La sélection de carottes océaniques et méditerranéennes, de carottes glaciaires arctiques et de séquences polliniques issues de tourbières, sélectionnées ici pour leur haute résolution au cours des stades isotopiques 2 et 3, fournissent des enregistrements caractérisés par un signal paléoclimatique identique pour la période considérée.

La méthode proposée ici, basée sur le calcul de fonctions de transfert par traitement du signal et analyse des données, permet la construction de deux courbes paléoclimatiques traduisant les variations du gradient de paléotempérature et de paléohumidité. La séparation du gradient de température du gradient d'humidité fournit une vision plus compréhensive des variations climatiques, et permet de contribuer à régler des polémiques récentes sur l'existence et la signification de certaines oscillations climatiques sur la période considérée, en montrant le rôle climatique majeur joué par les variations d'humidité.

Les résultats de l'étude permettent de proposer l'identification, au cours de la période 40.000 BP-10.000 BP, sur l'ensemble du territoire européen, de plusieurs oscillations (neuf oscillations numérotées 1a, 1b, 2a, 2b, 3, 4a, 4b, 5a, 5b), dont certaines à caractère tempéré et humide, et d'autres à caractère froid et humide.

Ces événements climatiques sont corrélés avec les dénominations historiques (Pré-Boréal, Dryas récent, Allerød, Dryas moyen, Bølling, Lascaux, Laugerie, Tursac, Maisières, Arcy, les Cottés et Hengelo) dont l'existence réelle, ainsi que la précision et la fiabilité, dans leurs sites éponymes, restent à valider.

Bruno Bosselin

François Djindjian
Université de Paris I
CNRS UMR 7041
Maison René Ginouvès

[10] Dans ces deux constructions toutefois, l'oscillation d'Hengelo apparaît comme une coupure majeure.

BIBLIOGRAPHIE

AMMAN B. 1993, *Flore et végétation au Paléolithique et au Mésolithique en Suisse*, in J.M. LE TENSORER (ed.), *SPM I, La Suisse du Paléolithique à l'aube du Moyen Âge, I: Paléolithique et Mésolithique*, Bâle, Soc. Suisse Préhist. et Archéol., 66-84.

DE BEAULIEU J.L., PONS A., REILLE M. 1982, *Recherches pollenanalytiques sur l'histoire de la végétation de la bordure nord du Massif Central (Massif-Central, France)*, «Pollens et Spores», 24, 2, 251-300.

DE BEAULIEU J.L., PONS, A., REILLE M. 1985, *Recherches pollenanalytiques sur l'histoire de la végétation des Monts d'Aubrac (Massif-Central, France)*, «Review of Palaeobotany and Palynology», 44, 37-80.

DE BEAULIEU J.L., PONS A., REILLE M. 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.

BERGER A. 1983, *Approche astronomique des variations paléoclimatiques*, in *Paléoclimat. Actes du colloque AGSO (Bordeaux 1983)*, «Cahiers du Quaternaire», n. spécial, 7-26.

BERGER A. *et al.* 1984, *Milankovitch and climate*, in A. BERGER, J. IMBRIE, J. HAYE, G. KUKLA, B. SALTZMANN (eds.), NATO ASI, série C, 126, 2 vol.

BIRKS H.J.B., GORDON A.D. 1985, *Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis*, London, Academic Press.

BLANC F., BLANC-VERNET L., LE CAMPION J. 1972, *Application paléoécologique de la méthode d'analyse factorielle en composantes principales, interprétation de microfaunes de foraminifères planctoniques quaternaires en Méditerranée, I: Études des espèces en Méditerranée occidentale*, s1, Tethys.

DAMBLON F., HASAERTS P. 1997, *Radiocarbon chronology of representative upper palaeolithic sites in the central European plain: A contribution to the SC-004 project*, «Préhistoire Européenne», 11, 255-276.

DANSGAARD W. *et al.* 1993, *Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record*, «Nature», 364, 218-220.

DENYS C. 1985, *Palaeoenvironmental and paleobiogeographical significance of the fossil rodent assemblages of Laetoli (Pliocene, Tanzania)*, «Palaeo», 52, 77-97.

DJINDJIAN F., KOZLOWSKI J., OTTE M. 1999, *Le Paléolithique supérieur en Europe*, Paris, Armand Colin.

EMILIANI C. 1955, *Pleistocene temperatures*, «Journal of Geology», 63, 538-578.

GASSE F., TEKAIA F. 1979, *La paléoécologie des diatomées: évolution des lacs de l'Afar central*, «Les Cahiers de l'Analyse des Données», 4,1, 81-94.

GROOTES P.M. *et al.* 1993, *Comparison of oxygen records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores*, «Nature», 366, 552-554.

GUIOT J. 1987, *Late Quaternary climatic changes in France estimated from multivariate pollen time series*, «Quaternary Research», 28, 100-118.

GUIOT J. 1990, *Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data*, «Palaeo», 80, 49-69.

GUIOT J. *et al.* 1989, *A 140 000 years 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.

HASAERTS P. 1990, *Evolution de l'environnement et du climat au cours de l'interpléniglaciaire en Basse-Autriche et en Moravie*, in *Feuilles de Pierre. Actes du colloque «Les industries à pointes foliacées du Paléolithique supérieur européen» (Cracovie 1989)*, ERAUL 42, 523-538.

HASAERTS P., CAHEN D. 1997, *The SC-004 research network 'Prehistory and evolution of the environment during the last 100.000 years in the great European plain': an overview*, «Préhistoire Européenne», 11, 213-225.

HAYS J., IMBRIE J., SHACKLETON N.J. 1976, *Variations in the earths' orbit: Pacemaker of the ice age*, «Science», 194, 1121-1132.

IMBRIE J., KIPP N.G. 1971, *A new micropalaeontological method for quantitative palaeoclimatology: Application to Late Pleistocene Carribean core*, in K.K. TURREKIAN (ed.), *The late Cenozoïc Glacial Ages*, New Haven, Yale University Press, 71-181.

JOHNSEN S.J. 1992, *Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core*, «Nature», 359, 311-313.

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 de France, 162, 189-198.

LABEYRIE J. 1984, *Le cadre paléoclimatique depuis 140.000 ans*, «L'Anthropologie», 88, 1, 19-48.

LAURIN B., ROUSSEAU D.D. 1985, *Analyse multivariée des associations malacologiques d'Achenheim: implications climatiques et environnementales*, «Bulletin de l'AFEQ», 21, 21-30.

MARQUET J.Cl. 1989, *Paléoenvironnement et chronologie des sites du domaine atlantique français d'âge pléistocène moyen et supérieur d'après l'étude des rongeurs*, Thèse de Doctorat, Géologie, Dijon, Université de Bourgogne.

MILANKOVITCH M.M. 1941, *Canon of insolation and ice-age problem*, Beograd, Koninglich Serbische Akademic.

MOLFINO B., KIPP N.G., MORLEY J.J. 1982, *Comparison of Foraminifera, coccolithophorid and Radiolarian palaeotemperature equations: assemblage coherency and estimate concordancy*, «Quaternary Research», 17, 279-313.

PATERNE M. *et al.* 1984, *Variations climatiques en mer Tyrrhénienne depuis 140.000 ans*, Prépublication, Gif sur Yvette, C.F.R., C.N.R.S.

PEREZ-OBIOL R., JULIA R. 1994, *Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30 000-Yr pollen record from Lake Banyoles*, «Quaternary Research», 41, 91-98.

PEYRON O. *et al.* 1998, *Climatic reconstruction in Europe for 18,000 YR B.P. from pollen data*, «Quaternary Research», 49, 132-196.

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.

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.

REILLE M., DE BEAULIEU J.L. 1990, *Pollen analysis of a long upper Pleistocene continental sequence in a Velay maar (Massif Central, France)*, «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», 80, 35-48.

REILLE M., DE BEAULIEU J.L., PONS A. 1985, *Recherches pollenanalytiques sur l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation du Cézallier, de la Planèze de St-Flour et de la Margeride (Massif-Central, France)*, «Pollens et Spores», 27, 2, 209-270.

ROUX M. 1979, *Estimation des paléoclimats d'après l'écologie des Foraminifères*, «Les Cahiers de l'Analyse des Données », 1, 1, 61-79.

SANCHEZ-GONI M.F. 1994, *L'environnement de l'homme préhistorique dans la région cantabrique d'après la taphonomie pollinique des grottes*, «L'Anthropologie», 98, 1-2, 379-417.

SANCHEZ-GONI M.F. 1996, *Les changements climatiques du Paléolithique supérieur. Enquête sur le rapport entre paléoclimatologie et préhistoire*, «Zéphyrus», 49, 3-36.

SANCHEZ-GONI M.F. 1999, *Végétation et climat sur le pourtour de la Méditerranée au cours du Pléistocène supérieur*, in *Les faciès leptolithiques du nord-ouest méditerranéen: milieux naturels et culturels*, C.P.F. XXIV, Carcassonne, vol. 1, 237-250.

SHACKLETON N.J. 1967, *Oxygen isotopes and Paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V 28-239 late Pliocene to latest Pleistocene*, «Geological Society», 145, 449.

VILETTE Ph. 1984, *Avifaunes du Pleistocène final et de l'Holocène dans le Sud de la France et en Catalogne*, Carcassonne, Laboratoire de Préhistoire (Atacina, 11).

WEGMULLER S. 1966, *Über die spät- und Postglaziale Vegetationgeschichte des südwestlichen Jura*, Berne, Verlag Hans Hüber.

WEIßMULLER W. 1997, *Eine Korrelation der δ^{18}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 metres of a 120 m deep section in northern Greece*, «Acta Botanica Neerlandica», 18, 4, 511-527.

WOILLARD G. 1978a, *Vegetation et climat des derniers 140.000 ans dans la tourbière de la Grande Pile (N.E. France)*, «Palaecology of Africa», 10, 1975-1977 (1978), 125-134.

WOILLARD G. 1978b, *Grande Pile Peat Bog: A continuous Pollen Record from the Last 140.000 Years*, «Quaternary Research», 9, 1-21.

WOILLARD G. 1979, *The last interglacial-glacial cycle at Grande Pile in Northeastern France*, «Bulletin de la Société Belge de Géologie», 88, 1, 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 (ed.), *Problèmes de stratigraphie quaternaire en France et dans les pays limitrophes*, suppl. 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 resolution of several sea- and ice-cores and pollen sequences of peat bogs, for the last 40.000 years, permits today to give evidence of palaeoclimatic oscillations of this period. A method of palaeoenvironment reconstitution, based on transfert functions computation, issued from pollen diagrams, is proposed. The method is building a palaeotemperature curve and a palaeohumidity curve, allowing to separate and correlate the two climatic components. A complete example of the method is developed on the data of the peat bog of Tenaghi-Philippon (Macedonia, Greece). All the analysed sequences (Tenaghi-Philippon, la Grande Pile, Banyoles, etc.), compared to sea-cores (KET 8004) and ice-cores (GRIP-Summit, Greenland) confirm the evidence of mild and humid oscillations, and cold and humid oscillations, in a three parts structured sequence: the interpleniglacial (up to 28.000 BP), the late pleniglacial (between 28.000 BP and 13.500 BP), and the tardiglacial (between 13.500 BP and 10.000 BP). A numbering system, avoiding usage of ancient interstadials still to valid in their eponym sites, is proposed.