

L'Europe de l'Ouest et la péninsule Ibérique de -120 000 ans à l'Actuel (reconstitutions cartographiques automatisées)

Western Europe and the Iberian Peninsula from -120 000 years to the Present (computerized reconstruction maps)

M. Garcin¹, C. Bajos², C. Del Olmo², P. Godefroy³

RESUME

L'objectif de ce travail, réalisé dans le cadre du projet CCE n° F12W-CT91-0075 "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions", est de fournir, à l'aide du logiciel *Géoprospect*, développé au BRGM, des cartes de reconstitutions de l'Europe de l'Ouest et de la péninsule Ibérique au cours du dernier cycle climatique (-120 000 ans à l'Actuel).

Après avoir défini les différents concepts concernant les variations climatiques et leurs corollaires géologiques, nous avons précisé les principes utilisés, la mise en oeuvre et les limites de telles reconstitutions.

Onze périodes ont été jugées digne d'intérêt et sont l'objet de reconstitutions des paléogéographies et des paléotempératures.

Dans un premier temps nous avons analysé l'impact de l'isostasie glaciaire sur l'Europe de l'Ouest au moyen de cartes situant les déformations négatives et positives (bourrelet) dans leurs contextes géographiques.

Ensuite, en tenant compte des niveaux marins et des déformations isostatiques de chaque période, nous avons reconstitué la topographie hors glace de l'Europe occidentale et plus particulièrement de l'Espagne.

Enfin, en appliquant une courbe de variation des températures moyennes annuelles sur ces géographies, au demeurant très différentes de l'actuelle, nous avons obtenu des cartes des températures moyennes annuelles de -120 000 ans à nos jours.

Les reconstitutions présentées ne doivent pas être abordées comme des postulats mais plutôt comme des illustrations de faits probables. Ces cartes s'avèrent utiles pour mieux comprendre les phénomènes qui se sont produits au Quaternaire et qui affecteront probablement nos contrées dans le futur. Elles permettent de plus de mieux intégrer la composante spatiale des phénomènes et leurs implications paléogéographiques.

ABSTRACT

The aim of this study, carried out as part of EEC Project No. F12W-CT91-0075, entitled "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions", is to construct paleo-maps of Western Europe and the Iberian Peninsula for the last climatic cycle (-120,000 years to Present) using the Geoprospect software developed at BRGM.

After defining the different concepts concerning the climatic variations and their geological corollaries, we determined the principles to be used and the method and limitations of such reconstructions.

Paleogeographic and paleotemperature reconstructions are being made for eleven periods considered to be of interest.

The first step was to analyse the impact of glacial isostasy on Western Europe through maps locating the deformations, both negative and positive (forebulges), in their geographical settings.

Then, taking into account the sea level and isostatic deformation for each period, we reconstructed the topography outside the ice cap for Western Europe and, more particularly, for Spain.

Finally, by applying a variation curve of average annual temperatures to these geographic settings, which incidentally were very different from those of today, we obtained mean annual temperature maps from -120,000 years to the present day.

These reconstructions should not be regarded as postulates, but as illustrations of probable facts. The maps have provided a better understanding of the phenomena that took place during the Quaternary and which will probably have an effect in the future. They also enable a better integration of the spatial component of the phenomena and their paleogeographic implications.

1 BRGM SGN/UPE/RNG Av de Concyr BP6009 45060 Orléans cedex 2 France

2 ENRESA Emilio Vargas, 7 28043 Madrid Espagne

3 BRGM SGN/UPE/RNG 117 Av. de Luminy 13009 Marseille France

INTRODUCTION

L'objectif de ce travail, réalisé dans le cadre du projet CCE n° F12W-CT91-0075 "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions", est de fournir des cartes de reconstitutions de l'Europe de l'Ouest et de la péninsule Ibérique au cours du dernier cycle climatique (-120 000 ans à l'Actuel). Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes appuyés sur le logiciel *Géoprospect* développé au BRGM (Garcin et Courbouleix 1991 a, b) dont la finalité est de fournir des illustrations cartographiques et de quantifier divers processus géologiques qui se sont produits au cours du Quaternaire.

Les principaux concepts, principes et les modalités que nous avons mis en oeuvre dans cette étude sont présentés. Pour chaque thème abordé (isostasie glaciaire, paléogéographie et paléotempérature) des avertissements sur les limites des méthodes et sur les données utilisées sont énoncés.

CONCEPTS

Les phénomènes à traiter et à visualiser, variations thermiques, isostasie glaciaire et variations du niveau marin sont des phénomènes sous contrôle climatique. Nous allons dans un premier temps définir rapidement les processus et leurs relations avec les variations du climat puis leurs interactions .

On admet à l'heure actuelle que, compte tenu de la répartition des continents sur le globe et notamment de la coïncidence entre le continent Antarctique et le pôle Sud, les climats sont en grande partie contrôlés par la variation des paramètres de rotation de la Terre. Cette théorie astronomique des climats, développée par Milankovitch (1941) puis reprise par Berger (1977,1988) stipule qu'en fonction des paramètres d'obliquité, d'excentricité et de précession des équinoxes l'ensoleillement de la terre variant, on peut avoir déclenchement de périodes glaciaires. De fait, depuis 2,4 millions d'années, la Terre subit une crise climatique qui s'exprime par une succession de périodes froides (glaciations) et de périodes plus tempérées (interglaciaires).

Durant ces périodes froides, les précipitations sont dans certaines régions du globe stockées sous forme de neige puis de glace en raison des températures moyennes inférieures à 0° C qui y règnent. Si ces périodes de froid durent suffisamment, des calottes glaciaires continentales (inlandsis) vont s'y développer, croître et peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Les volumes d'eau stockée sous forme de glace peuvent représenter plusieurs dizaines de millions de kilomètres cube (Mörner 1980, Shackleton et *al.* 1973 à 1990, Berger 1989) qui ne seront pas rendus à l'Océan mondial. Ce blocage dans le cycle de l'eau va être responsable d'une baisse du niveau marin global qui peut atteindre 120 m (Weischélien ou Würm). On admet généralement que le niveau moyen de l'Océan mondial est en corrélation directe avec le volume d'eau stockée dans les inlandsis et les glaciers de montagne. Toutefois, il faut souligner que les réponses à l'échelle régionale de ces variations du niveau marin moyen peuvent être perturbées par des phénomènes de géodynamique interne tels que des mouvements verticaux positifs ou négatifs d'origine purement tectonique. Parallèlement à la croissance et au développement des inlandsis, et en regard de leurs masses importantes, on constate une déformation de la Terre sous la surcharge.

Ce phénomène, que l'on nomme isostasie peut être généré par toutes formes de surcharge (masse d'eau, corps sédimentaire, appareil volcanique etc.). On peut définir l'isostasie comme étant l'état d'équilibre qui tend à se réaliser dans le globe sous l'effet d'une charge. Dans le détail, l'isostasie apparaît comme beaucoup plus complexe car, d'une part, elle dépend des modalités de la croissance de chaque inlandsis (épaisseur, géométrie) mais aussi des propriétés rhéologiques de la Terre. En effet, on considère à l'heure actuelle que dans le cas de l'isostasie glaciaire, l'épaisseur totale de la terre est impliquée.

L'isostasie glaciaire pose donc le double problème de l'évaluation des temps d'accès à l'équilibre isostatique et de la géométrie de la déformation. De plus, ces déformations isostatiques ont un impact sur la paléogéographie et l'altimétrie de l'aire considérée susceptible de modifier les températures en ces mêmes points (effet de rétroaction ou "feed-back").

PRINCIPES

Pour élaborer cet atlas, nous avons dans un premier temps procédé à une recherche bibliographique afin d'en extraire des valeurs pour chaque variable à traiter. Ces valeurs une fois synthétisées et homogénéisées, nous fournissent des courbes de variation de chaque paramètre en fonction du temps. Ces courbes ont ensuite été discrétisées afin d'en extraire les valeurs marquantes ou caractéristiques qui permettront de calculer et de visualiser les différents paramètres aux instants les plus significatifs.

Pour chaque période considérée nous avons procédé dans l'ordre suivant:

- calcul des géométries des inlandsis et des déformations isostatiques associées,
- calcul de la paléotopographie en fonction des déformations calculées précédemment et du niveau marin,
- calcul des cartes thermiques.

Ces données seront ensuite restituées sous forme de cartes recouvrant 30° par 30° géographiques, la résolution est d'un point calculé toutes les 5 minutes d'arc (environ 9,2 km) ce qui représente pour chaque carte et pour chaque calcul 129.600 points de référence.

MISE EN OEUVRE

CALCUL DE L'ISOSTASIE GLACIAIRE

Les évaluations des déformations isostatiques vont s'effectuer à partir des courbes d'évolution de l'épaisseur maximum de chaque inlandsis à chaque période.

Pour l'élaboration des déformations isostatiques nous avons utilisé la courbe de réponse isostatique de Mörner (1980) donnant la déformation isostatique totale en fonction de la distance au centre d'englacement fennoscandien lors du dernier maximum glaciaire.

Nous avons ensuite paramétré cette courbe afin de pouvoir évaluer la déformation isostatique pour des glaciers d'épaisseur, de volume et de position différents.

Pour chaque point de la zone d'étude (Modèle Numérique de Terrain, MNT), pour chaque période considérée, nous avons calculé en fonction de l'épaisseur et de la géométrie de chaque glacier la déformation isostatique résultante. Ce calcul nous fournit un Modèle Numérique de Déformation (MND) à la même résolution que le MNT et à la même position géographique. Ce MND sera ensuite additionné au MNT afin de recréer la paléotopographie.

Avertissements : les résultats en chaque point sont fonctions du modèle utilisé, de la géométrie de chaque calotte, de sa distance par rapport au point considéré et des interférences entre les déformations générées par chaque inlandsis. Ces déformations correspondent au maximum de déformations possibles pour les conditions glaciologiques fournies en admettant que l'équilibre isostatique soit atteint.

RECONSTITUTIONS PALEOGEOGRAPHIQUES

Les cartes paléogéographiques sont obtenues après calcul des déformations isostatiques et calcul de la paléotopographie. Ces cartes sont effectuées par seuillage des valeurs situées en dessous du niveau marin courant; les lignes de rivage reflétant les points d'intersection entre topographie/bathymétrie et niveau de la mer.

Avertissements: A cette échelle, ces reconstitutions permettent d'avoir une bonne évaluation des paysages anciens, des migrations des lignes de rivage et de leur impact sur la continentalisation du climat en Europe de l'Ouest. Il faut toutefois rappeler que les phénomènes d'érosion et les mouvements tectoniques n'étant pas pris en compte, quelques divergences peuvent apparaître avec des reconstitutions paléogéographiques très localisées dans lesquelles ces processus auraient été intégrés.

ELABORATION DES CARTES THERMIQUES

La courbe de variation des paléotempératures par rapport à l'Actuel est appliquée à un point de référence dont on connaît la position géographique, l'altitude par rapport au niveau marin actuel et la température moyenne annuelle (TMA) actuelle. Cette température moyenne annuelle actuelle sera corrigée à chaque période de calcul par la variation de la température par rapport à l'Actuel. De cette nouvelle température on calculera la température à cette même latitude et longitude ramenée au niveau de la mer à l'instant *i* à l'aide du gradient thermique latitudinal. Ensuite pour chaque point constituant la zone de travail (MNT), on calculera la température théorique en ce point à l'aide des gradients altitudinal, latitudinal et longitudinal en se référant à la température moyenne annuelle du point de référence ramené au niveau de la mer à l'instant *i*.

Les gradients utilisées pour l'élaboration de ces cartes sont les suivants :

Altimétrie : -1°C pour 166 m d'élévation,

Latitude : -1°C pour 200 km vers le Nord,

Longitude (facteur de continentalité en Europe): -1°C pour 10° géographique de déplacement vers l'Est (Goodess et al. 1991).

Le point de référence (situé à proximité de Madrid) utilisé pour les calculs des températures moyennes annuelles est situé à 40°24' de latitude nord et 3°45' de longitude ouest; son altitude actuelle est de 667m et sa température moyenne annuelle de 13,9°C.

Avertissement : cette méthode permet d'évaluer les températures moyennes annuelles à partir d'hypothèses concernant des reconstitutions de paléotempératures et de comparer, en fonction de ces mêmes hypothèses l'impact et la plausibilité de celles-ci. Il faut toutefois rappeler que cette méthode admet implicitement que les gradients thermiques varient peu au cours du temps.

Le facteur de continentalité est très fortement simplifié puisqu'il se réduit à une variation constante plus l'on s'éloigne de l'océan Atlantique.

PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES

Afin d'élaborer les courbes d'évolution des températures moyennes annuelles, du niveau marin moyen et des épaisseurs de glace des inlandsis nord-européens, nous nous sommes appuyés, dans la mesure du possible sur des données publiées. Les variations thermiques proviennent de Guiot et *al.* (1989), les variations d'épaisseur des inlandsis sont issues des travaux de Boulton et *al.* (1977,1985) et Elhers (1990) enfin en ce qui concerne les niveaux marins, les informations ont été extraites pour l'essentiel de Chapell et *al.* (1986) et Berger et *al.* (19..). Du fait que les paramètres à prendre en compte sont d'origine climatique et référés aux variations de la température, nous avons utilisé la chronostratigraphie mis en oeuvre par Guiot et *al.* (1989) en France; cette dernière est aisément corrélable avec la terminologie du nord-ouest de l'Europe (où les inlandsis se sont développés) et aux stades isotopiques marins (d'où proviennent les courbes de variations du niveau marin moyen). Compte tenu de la problématique de l'étude et de l'échelle de travail (l'Europe), nous avons estimé que 11 périodes principales méritaient d'être traitées. Ces différentes périodes sont représentées et corrélées aux diverses échelles chronostratigraphiques (fig. 1).

Chronologie	Chronologie glaciaire	Chronologie pollinique	NW Europe	Age (Ka)	Stade Isotopique
Holocène	Post-glaciaire	Holocène	Holocene	12	1
Pléistocène supérieur	Wurm III	Pléniglaciaire supérieur		25	2
		Interstade 2		32	3
	Wurm II	Pléniglaciaire moyen		41	3
		Interstade 1		60	3
	Wurm I	Pléniglaciaire inférieur		72	4
		St Germain 2	Odderate	84	5a
		Melisey 2	Rederstall	92	5b
		St Germain 1	Brorup	103	5c
		Melisey 1	Herning	110	5d
		Riss-Wurm	Eémien	Eemian	127

Figure 1: Tableau de corrélation chronostratigraphique du Pléistocène supérieur

Pour chacune de ces 11 périodes, la valeur que nous avons utilisée est la plus caractéristique de chaque paramètre; ces valeurs qui ont servi à l'élaboration des cartes sont exprimées en fonction du temps par des courbes dans les figures 2, 3, 4 et sous forme de tableau de valeurs dans la figure 5 .

Dans les cas où aucune donnée n'existe nous avons fournit au système une donnée interpolée à partir des valeurs les plus proches afin d'obtenir une succession d'événements la plus vraisemblable possible. Les figures 2, 3, 4 ne tiennent pas compte des valeurs des époques intermédiaires qui n'ont pas été traitées ce qui explique le tracé très schématique des courbes.

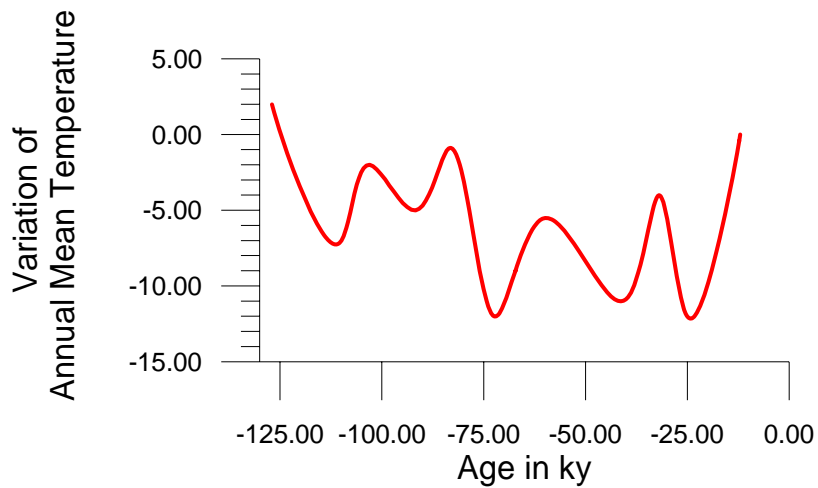


Figure 2 : Courbe de variation de la température moyenne annuelle de l'Eémien à l'Actuel

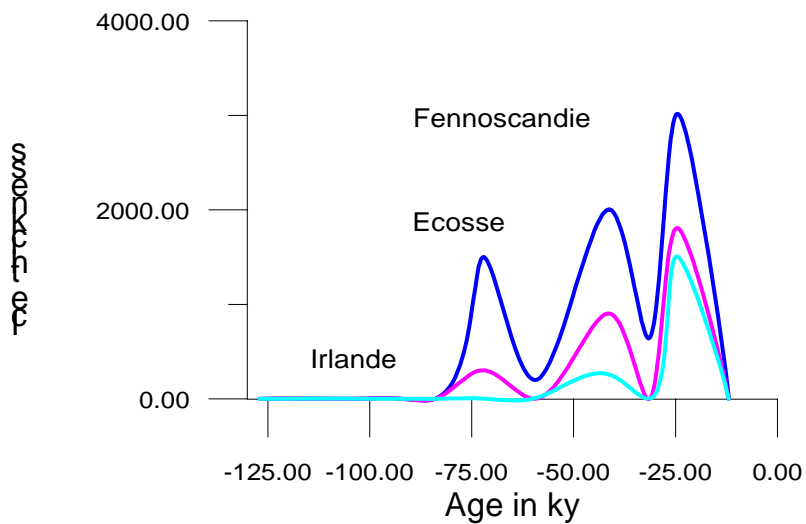


Figure 3 : Courbe de variation des épaisseurs maxima des inlandsis fennoscandien, écossais et irlandais de l'Eémien à l'Actuel

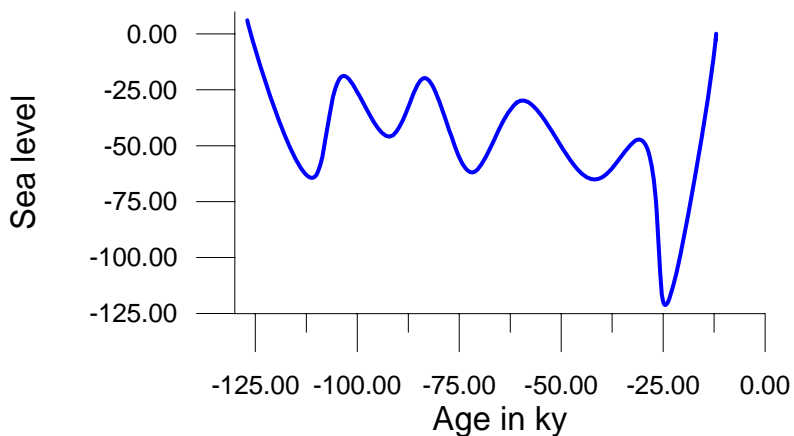


Figure 4: Courbe de variation du niveau marin moyen de l'Eémien à l'Actuel

Chronologie	Nom	Age (Ka)	Variation temp. moyenne annuelle	Niveau marin relatif	Epaisseur glace Fennescandie	Epaisseur glace Ecosse	Epaisseur glace Irlande
Holocène	Holocène	12	0	0	0	0	0
Pléistocène supérieur	Pléni. sup.	25	-12	-120	3000	1800	1500
	Interstade	32	-4	-48	650	0	0
	Pléni. moy.	41	-11	-65	2000	900	250
	Interstade	60	-5,5	-30	200	0	0
	Pléni. inf.	72	-12	-62	1500	300	0
	St Germain 2	84	-1	-20	0	0	0
	Melisey 2	92	-5	-46	0	0	0
	St Germain 1	103	-2	-19	0	0	0
	Melisey 1	110	-7	-63	0	0	0
	Eémien	127	2	6	0	0	0

Figure 5: Valeurs des paramètres utilisés pour l'élaboration des cartes de reconstitution

CONCLUSIONS

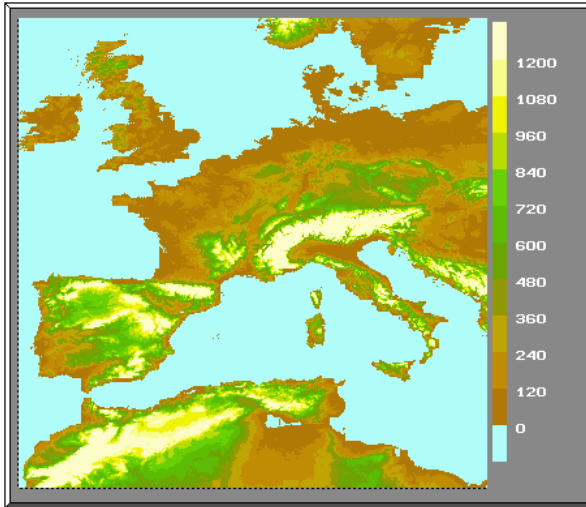
Les reconstitutions paléogéographiques (fig.6) sont la résultante de la topographie actuelle, des déformations isostatiques et des variations du niveau marin moyen. Rappelons que ces reconstitutions ne tiennent pas compte des mouvements tectoniques, de l'érosion et que les glaciers n'y sont pas représentés; les cartes fournies illustrent donc l'image de la topographie hors glace.

A l'échelle de l'Europe, ces cartes paléogéographiques permettent d'appréhender dans toute son ampleur l'importance des variations eustatiques sur notre continent. Cette observation est encore plus sensible pour la partie septentrionale de la zone d'étude (nord de la France, Grande Bretagne, Belgique, Hollande, Danemark, Allemagne du Nord, Pays Baltes etc.). En effet, dans ces régions, les variations eustatiques vont être responsables de la migration de la ligne de rivage à plusieurs dizaines et dans certains cas plusieurs centaines de km de l'actuelle. Cette migration va être responsable de la modification des écoulements fluviaux, de la continentalisation du climat en certains lieux en les éloignant de l'influence océanique et modifier *pro parte* les équilibres écologiques.

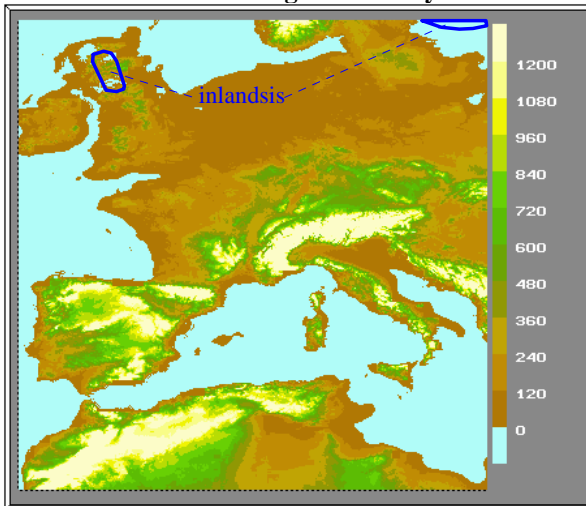
Les évaluations des paléotempératures sur l'ensemble de l'Europe de l'Ouest (fig.6) ont permis de dresser à partir d'une courbe de variation de la température moyenne annuelle, des variations glacio-eustatiques et de l'isostasie glaciaire, des cartes illustrant une possible organisation thermique des différentes périodes (de l'Eémien à l'Actuel) que nous avons sélectionné durant le dernier cycle glaciaire. Ces simulations bien que ne tenant pas compte du rôle d'"accumulateur de frigidités" des inlandis (en période froide), permettent de mettre en évidence les grands ensembles thermiques de l'Europe. L'un des faits marquants de ces études est de démontrer la sensibilité des plateaux et des sierras ibériques aux divers coups de froid du dernier cycle climatique. En effet, du fait de leurs altitudes moyennes assez élevées, ces régions basculent très rapidement sous une température moyenne annuelle proche ou inférieure à 0°C. Rappelons que c'est dans des conditions thermiques identiques et lorsque l'humidité est suffisamment élevée que les précipitations sous forme de neige persistent et peuvent donner naissance à des glaciers. Ces cartes thermiques sont donc en accord avec les observations de terrain et les interprétations de l'ITGE qui signale l'existence possible de petits glaciers sur la chaîne Cantabrique et sur les Sierras de la Demanda, Guardarrama, Nevada etc.(ITGE 1989). Dans des environnements où les précipitations sont faibles, ces zones verront l'installation d'un permafrost qui en fonction des conditions géothermiques, physiques, chimiques du substrat mais aussi des nappes aquifères et de la végétation pourra être de type sporadique, discontinu ou continu. Ce phénomène, d'après nos reconstitutions, semble susceptible de concerner des surfaces non négligeables et apparaît comme un phénomène important dans l'histoire quaternaire de l'Espagne en dépit de sa position géographique méridionale.

L'autre fait marquant est que, du fait de sa topographie, la péninsule Ibérique est le siège, durant les périodes froides du dernier cycle, de températures relativement clémentes sur ses côtes qui vont, dès que l'on s'éloigne du rivage, brusquement chuter et éventuellement passer sous la barre des 0°C de température moyenne annuelle.

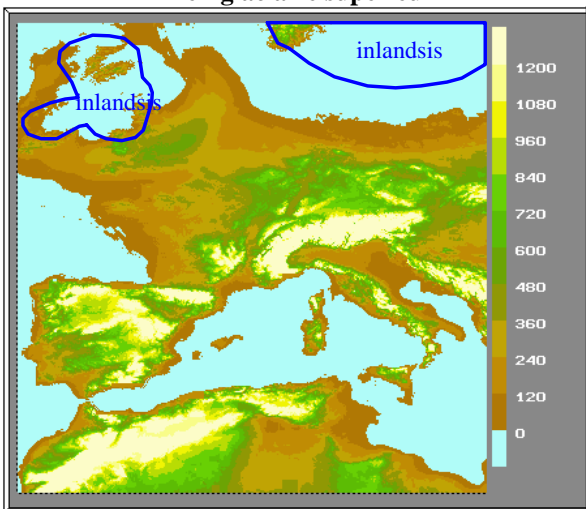
Figure 6: Exemple de reconstitutions cartographiques
 Paléogéographies de l'Europe de l'Ouest
 Altitude en mètres
L'Eémien



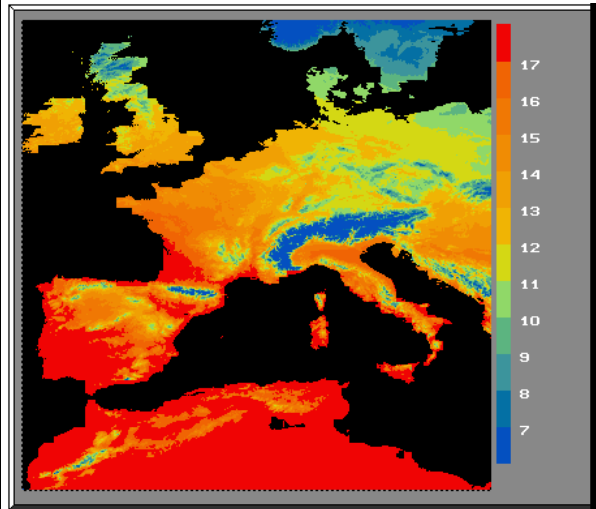
Pléniglaciaire moyen



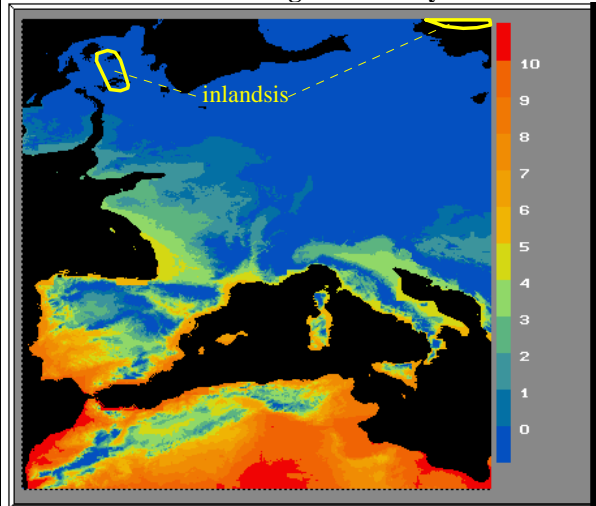
Pleniglaciaire supérieur



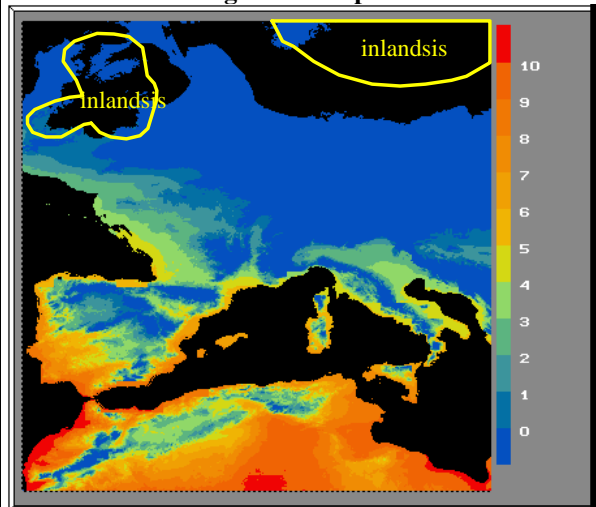
Paléotempératures de l'Europe de l'Ouest
 Températures moyennes annuelles en °C
L'Eémien



Pléniglaciaire moyen



Pleniglaciaire supérieur



BIBLIOGRAPHIE

- BERGER A. (1977) - Long term variations of caloric insolation resulting from the Earth' orbital elements. *Quat.Res.*, 9(2), p.139-167.
- BERGER A. (1988) - Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics*, 26(4), p.624-657.
- BERGER A. (1989) - Climate and Geosciences, Eds. BERGER et al. Kluwer Academic Publishers.
- BOULTON G.S., JONES A.S., CLAYTON K.M., KENNING M.J (1977)- A British ice-sheet model and patterns of glacial erosion and deposition in Britain. *British Quaternary studies*. Eds. F.W. Shotton, Oxford Univ. Press. p. 231-246
- BOULTON G.S., SMITH G.D., JONES A.S., NEWSOME J. (1985) - Glacial geology and glaciology of the last mid-latitude ice sheets. *J.geol.Soc.London*, 142, p.447-474, 23 fig.
- CHAPPELL J., SHACKLETON N.J. (1986) - Oxygen isotopes and sea level. *Nature*, 324, p.137-140.
- EHLERS J. (1990) - Reconstructing the dynamics of the North-West european Pleistocene ice sheets. *Quat.Sci.Rev.*, 9,p.71-83.
- GARCIN M., COURBOULEIX S. (1991a) - Géoprospect: maquette d'un outil de géoprospective. Rapport BRGM R32138, 36 p.,15 fig.
- GARCIN M., COURBOULEIX S. (1991b) - Géoprospect: maquette d'un outil de géoprospective, nouveaux développements. Rapport BRGM R32517, 28 p.,11 fig.
- GOODESS C.M, PALUTIKOF J.P., DAVIES T.D. (1991) - Studies of climatic effects and impacts relevant to deep underground disposal of radioactive waste. Final Report to UK Nirex Ltd. Climatic research unit, University of East Anglia, Norwich , NR4 7TJ.
- GUIOT J., PONS A. BEAULIEU J.L.(de), REILLE M. (1989) - A 140 000 years climatic reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 338; p.309-313.
- ITGE (1989) - Mapa del Cuaternario de Espana, Madrid, 279 p. et 1 carte h.t. au 1/1 000000.
- MÖRNER N.A. (1980) - Earth rheology, isostasy and eustasy. N.A. MÖRNER Ed. John Wiley & Sons, XV-599 p.
- SHACKLETON N.J. (1989) - Paleoclimate: deep trouble for climate change. *Nature*, 342(6250), p.616-617.
- SHACKLETON N.J., IMBRIE J. (1990) - The $\delta^{18}\text{O}$ spectrum of oceanic deep water over five-decade band. *Climatic change*, 16(2), p.217-230.
- SHACKLETON N.J., OPDYKE N.D. (1973) - Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperature and ice volumes on 10^5 and 10^6 year scale. *Quat.Res.*, 3(1), p.39-55.
- SHACKLETON N.J., OPDYKE N.D. (1976) - Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-239, late Pliocene to latest Pleistocene. Geological society of America, Memoir 145,p.449- 464.
- SHACKLETON N.J., IMBRIE J., HALL M.A. (1983) - Oxygen and carbon isotope record of East Pacific cores V19-30: implications for the formation of deep water in the late Pleistocene North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, 65, p.233-244.
- SHACKLETON N.J., IMBRIE J., PISIAS N.G. (1988) - The evolution of oceanic oxygen isotope variability in North Atlantic over the past three million years. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B, 318, p.679-688.