



HAL
open science

Métallurgie et histoire de l'environnement au cours des cinq derniers millénaires en pays basque nord (vallée de Baigorri, Pyrénées Atlantiques, France) : résultats préliminaires d'une approche interdisciplinaire

Didier Galop, Fabrice Monna, Argitxu Beyrie, Laurent Carozza, Vincent Mougin,
Gilles Parent, Fabrice Marembert

► To cite this version:

Didier Galop, Fabrice Monna, Argitxu Beyrie, Laurent Carozza, Vincent Mougin, et al.. Métallurgie et histoire de l'environnement au cours des cinq derniers millénaires en pays basque nord (vallée de Baigorri, Pyrénées Atlantiques, France) : résultats préliminaires d'une approche interdisciplinaire. *Archeologia Postmedievale*, 2002, 6, pp.155-169. <halshs-00967420>

HAL Id: halshs-00967420

<https://shs.hal.science/halshs-00967420v1>

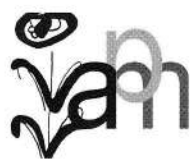
Submitted on 28 Mar 2014

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.



HAL Authorization



ARCHEOLOGIA POSTMEDIEVALE

SOCIETÀ AMBIENTE PRODUZIONE

6
2002

ESTRATTO

EDIZIONI ALL'INSEGNA DEL GIGLIO

Métallurgie et histoire de l'environnement au cours des cinq derniers millénaires en pays basque nord (Vallée de Baigorri, Pyrénées Atlantiques, France): résultats préliminaires d'une approche interdisciplinaire

Didier Galop*, Fabrice Monna**, Argitxu Beyrie***, Laurent Carozza****, Vincent Mougin*, Gilles Parent*****, Fabrice Marembert*****

Abstract: An interdisciplinary research combining palynology and lead isotopic geochemistry was performed in a peat bog of the Basque Country, in an area recognized by archaeology as being an old metallurgical centre. These various analyses make it possible to reconstitute mining and metallurgical activities and to appreciate the impact on forest during last five millennia. Several phases are attested between late Neolithic and modern times (Middle Bronze age, Late Bronze age, Antiquity and finally modern time). Most of these phases are clearly related to forest clearance, however it arises that locally the impact of the metallurgy on wood peaks at the beginning of centuries 18th.

Key words: metallurgy, geochemistry, palynology, archaeology, environmental history, Basque Country.

1. Introduction

Les travaux engagés depuis 1999 dans le cadre du Projet Collectif de Recherche "Paléoenvironnement et dynamiques de l'anthropisation de la montagne basque" tentent d'aborder dans une perspective interdisciplinaire les étapes et les modalités de l'anthropisation de l'extrémité occidentale de la chaîne pyrénéenne dans la longue durée (GALOP *et al.* 1999; GALOP *et al.* 2000; GALOP *et al.* 2001). C'est dans ce cadre qu'ont été amorcées en 2001 des recherches relatives à l'histoire ainsi qu'à l'influence des activités métallurgiques sur l'environnement de cette région, en recentrant les investigations sur la vallée de Baigorri qui est considérée de longue date comme un important foyer métallurgique du sud de la France. Tout en constituant un prolongement vers l'ouest des Pyrénées des travaux multidisciplinaires antérieurs réalisés en Ariège et dans les Pyrénées-orientales (FRUHAUF 1980; BONHÔTE 1992; VERNA 1994; DUBOIS *et al.* 1998; GALOP 1998; IZARD 1999; DAVASSE 2000) ces recherches visent également à ouvrir de

nouvelles pistes méthodologiques jusqu'alors inexplorées en domaine pyrénéen.

C'est parallèlement et en collaboration avec les recherches archéologiques minières et métallurgiques préexistantes (PARENT 1997; ANCEL 1999; ANCEL 2001; ANCEL *et al.* 2001; BEYRIE 2000; BEYRIE 2001; BEYRIE sous presse), que s'est mis en place dans cette vallée un dispositif de recherche orienté sur l'histoire de l'environnement. Dans un premier temps, celui-ci s'organise autour de recherches paléoenvironnementales alliant l'analyse palynologique et géochimique de tourbières; l'étude anthracologique de différents dépôts de charbons de bois (charbonnières, crassiers, bas-fourneaux, mines), ainsi que l'étude dendrochronologique des bois de mines. Compte tenu de l'abondance des sources textuelles anciennes documentant cette vallée, ces données paléoécologiques seront par la suite confrontées et complétées par des études éco-historiques.

Il est pour l'heure impossible de faire un premier bilan de ces travaux dont certains n'ont été initiés que très récemment, par conséquent nous ne présentons dans cette contribution que les résultats acquis par les analyses palynologiques et géochimiques de la tourbière de Quinto Réal située dans la haute vallée de Baigorri.

1.1 La vallée de Baigorri: une vallée métallurgique ancienne

La vallée de Baigorri (Fig. 1), présente d'un point de vue minéralogique une certaine richesse de par la quantité mais surtout la variété des gîtes métal-

* Laboratoire de Chrono-Écologie, UMR 6565 CNRS - 16, route de Gray, F-25030 Besançon Cedex, France.

** Laboratoire GéoSol, UMR INRA Université de Bourgogne A111, CST, 6Bld Gabriel, F-21000, Dijon, France.

*** UTAH-UMR 5608 CNRS, Maison de la recherche - Université Toulouse 2, F-31058 Toulouse Cedex, France.

**** INRAP et Centre d'Anthropologie, UMR 8555 CNRS - 30 Allées J. Guesde, F-31000 Toulouse Cedex, France.

***** Association Euzko-arkeologia, F-64120 Larceveau, France.

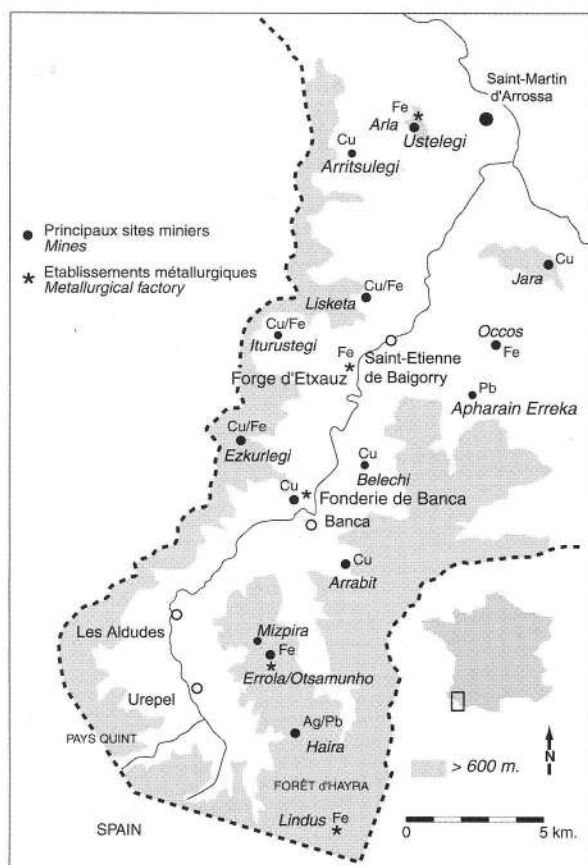


Fig 1 – Localisation des principaux sites miniers et établissements métallurgiques de la vallée de Baigorri.

lifères qu'elle recèle. Des minéralisations à sidérite (carbonate de fer, FeCO_3) et chalcoppyrite (sulfure de cuivre, CuFeS_2) se répartissent sur un large secteur compris entre le massif d'Iparla au nord-ouest et l'extrémité de la vallée des Aldudes au sud-est. Dans des terrains du Permo-Trias, ces minéralisations sont presque exclusivement constituées de sidérite; le quartz et la chalcoppyrite étant rares. En revanche, dans les séries paléozoïques, la sidérite est associée à de la chalcoppyrite et à des cuivres gris (sulfure de cuivre et d'argent) dans des terrains ordoviciens, ainsi qu'à des indices de cuivre, de plomb et de zinc dans les terrains du dévonien. D'une manière générale, on peut observer un lien entre la lithologie des terrains et les minerais qu'ils contiennent: les niveaux détritiques de l'Ordovicien présentent des indices de cuivre et de fer, tandis que les séries du Dévonien contiennent du cuivre, du fer, du plomb et du zinc.

La concentration et la diversité de ces gîtes sur une aire géographique relativement restreinte

désigne tout naturellement un fort potentiel d'exploitations minières et métallurgiques. Dès l'Antiquité et parfois jusqu'au XX^e siècle, les ressources métallifères de la vallée de Baigorri ont été exploitées. Les traces d'activités s'y retrouvent en abondance et désignent une exploitation s'inscrivant dans la longue durée.

Parmi la dizaine de sites miniers recensés à ce jour, le plus important reste incontestablement celui de Banca (Fig. 1 et 2) qui est encore de nos jours associé aux vestiges de la fonderie de cuivre édifée en 1747 et de l'usine à fer du XIX^e siècle. Des traces d'ouvrages modernes et antiques y ont été reconnus; tandis que l'hypothèse d'une exploitation durant le Moyen-Âge reste encore à vérifier. Les sources textuelles restent désespérément muettes à ce sujet, et les suspicions d'une exploitation médiévale ne reposent que sur les résultats d'une seule datation indiquant la possibilité d'une phase d'activité minière entre le X^e et le XII^e siècle. Si l'exploitation moderne révèle une production de grande envergure (on estime qu'au XVIII^e siècle, l'exploitation de la mine aurait fourni 1200 tonnes de cuivre et 12-15 tonnes d'argent), les travaux anciens n'en demeurent pas moins importants. Les minéralisations de cuivres gris et de chalcoppyrite y ont été exploitées exclusivement pour la production de cuivre durant l'Antiquité. A ce jour, environ 400 mètres de galeries anciennes ont été identifiées sans compter les chambres d'exploitation. Une première série de datations dendrochronologiques effectuée sur des bois de chêne retrouvés en place dans deux de ces galeries anciennes indiquent deux phases d'abattages situées, pour la première, entre 7 et 30 après J.-C. et entre 35 et 66 après J.-C., pour la seconde (PERRAULT, GIRARCLOS 2001).

Les indices des activités minières et métallurgiques anciennes ne se limitent pas pour autant au seul site de Banca et à l'exploitation du cuivre. Ainsi, la mise en œuvre de prospections minières modernes en forêt d'Hayra (Fig. 1) révéla l'existence de travaux plus anciens sur des minéralisations plombifères. Les exploitants modernes attribuèrent ces travaux aux romains, chronologie que vint confirmer la découverte de mobilier gallo-romain dans la forêt d'Hayra en 1991 (DUPRÉ *et al.* 1992-1993). L'exploitation du fer est, elle aussi, bien attestée toutes périodes confondues. Concernant les preuves d'exploitations antiques, les prospections archéologiques récentes (BEYRIE 2000; BEYRIE 2001) met-

tent en évidence dans la partie amont de la vallée des Aldudes l'existence de nombreux vestiges miniers et métallurgiques, principalement dans le bassin d'Urepel (Otsamunho, Errola, Meharroztegui, Atxegilepo) et dans la petite vallée de l'Hayra (Lindus) (Fig. 2). Pour l'heure, les travaux archéologiques, qui ont été optimisés par des prospections magnétiques, sont engagés sur la montagne d'Errola (BEYRIE 2001). Au total, près d'une dizaine de sites métallurgiques (ateliers de réduction) se répartissent sur près de 2,5 km, entre 660 et 780 mètres d'altitude, sur le versant ouest de l'interfluve séparant la vallée des Aldudes de celle de l'Hayra. Les ateliers d'Errola 3 et 5, qui sont associés à des mines à ciel ouvert, présentent des vestiges de structures de réduction (tuyère, emplacement de bas-fourneaux) datés par le radiocarbone. Les âges obtenus situent le fonctionnement de ces ateliers entre 148 avant J.-C et 250 après J.-C. (BEYRIE 2001). A ce district minier s'ajoutent de nombreux indices similaires qui parsèment l'ensemble de la vallée, mais c'est sans aucun doute plus au nord, sur le massif de l'Arla (Fig. 1), que l'activité métallurgique antique du fer fut la plus dense. Les vestiges d'une trentaine d'ateliers sidérurgiques y ont été identifiés. Ils jouxtent d'imposants travaux miniers superficiels réalisés sur les affleurements d'un filon de sidérite. convoité dès les premiers siècles de notre ère, ce filon fut activement exploité à l'époque moderne et alimenta successivement les divers établissements métallurgiques tels que la forge d'Etxauz (Saint-Etienne-de-Baigorri) fondée en 1640 et dont l'activité cessa en 1785, faute de combustible (Fig. 1). La richesse de ce filon suscita la construction d'un haut-fourneau à l'emplacement de l'ancienne fonderie de cuivre de Banca. Etablie dès 1823, l'usine à fer de Banca connaitra une activité discontinue jusqu'en 1850.

Compte tenu de ce contexte métallurgique, dont les premiers indices remontent au II^{ème} siècle avant notre ère, il n'est pas exclu que des travaux plus anciens (protohistoriques) aient pu exister, notamment sur des affleurements de chalcopirite. Cependant il n'existe localement encore aucune preuve archéologique d'une activité aussi ancienne. De même, si les exploitations minières et métallurgiques commencent à être bien documentées pour les deux derniers millénaires, leur impact sur l'environnement est quant à lui presque totalement méconnu, à l'ex-

ception de la période moderne pour laquelle quelques études historiques ont appréhendé sous un angle principalement socio-économique la gestion des espaces forestiers dévolus aux prélèvements métallurgiques (HOURMAT 1995). Aussi, les travaux engagés (GALOP *et al* 2001; MONNA *et al.* in prep.) dans la haute vallée des Aldudes sur la tourbière de Quinto Real constituent-ils une nouvelle voie de recherche complémentaire des investigations archéologiques et historiques. Cette approche intégrant l'étude palynologique et géochimique d'une archive naturelle permet d'aborder, *via* l'analyse des paléopollutions atmosphériques, la longue durée des activités minières et métallurgiques, tandis que les données polliniques rendent compte des transformations environnementales imputables à ces activités et/ou aux pratiques agro-pastorales.

1.2 La mémoire du plomb comme marqueur des activités minières et métallurgiques

L'étude géochimique des registres sédimentaires: tourbières (VAN GEEL *et al.* 1989; SHOTYK *et al.* 1996; MARTINEZ-CORTIZAS *et al.* 1997; WEISS *et al.* 1997; GÖRRES, FRENZEL 1997; KEMPTER *et al.* 1997; MACKENZIE *et al.* 1998; KEMPTER, FRENZEL 1999; KEMPTER, FRENZEL 2000; SHOTYK *et al.* 2000; MIGHALL *et al.* 2002), glaces (HONG *et al.* 1994; BOUTRON 1995; ROSMAN *et al.* 1997), sédiments lacustres (SCHETTLER ROMER 1998) et marais côtiers (ALFONSO *et al.* 2001), permet de retracer l'histoire des dépôts atmosphériques en micro-polluants métalliques, et donc de reconstruire en partie la chronologie des grandes phases d'exploitation. À titre d'exemple, on a ainsi récemment démontré que l'incidence des activités extractives et métallurgiques pendant l'Antiquité dépasse largement le cadre régional du bassin méditerranéen puisqu'elle affecte des territoires aussi reculés que le Groenland (BOUTRON *et al.* 1994; HONG *et al.* 1994) et le Nord de la Suède (BRÄNNVALL *et al.* 1997; BRÄNNVALL *et al.* 1999). Deux problèmes se posent alors. Ils concernent d'une part la bonne conservation du signal géochimique contenu dans l'archive, et d'autre part les capacités de discrimination des apports locaux face à la contribution continentale. En outre, la seule mesure des concentrations en métaux lourds peut engendrer certaines ambiguïtés, notamment dans les cas où les variations observées résultent de phénomènes naturels comme par exemple l'augmentation des apports détrit-

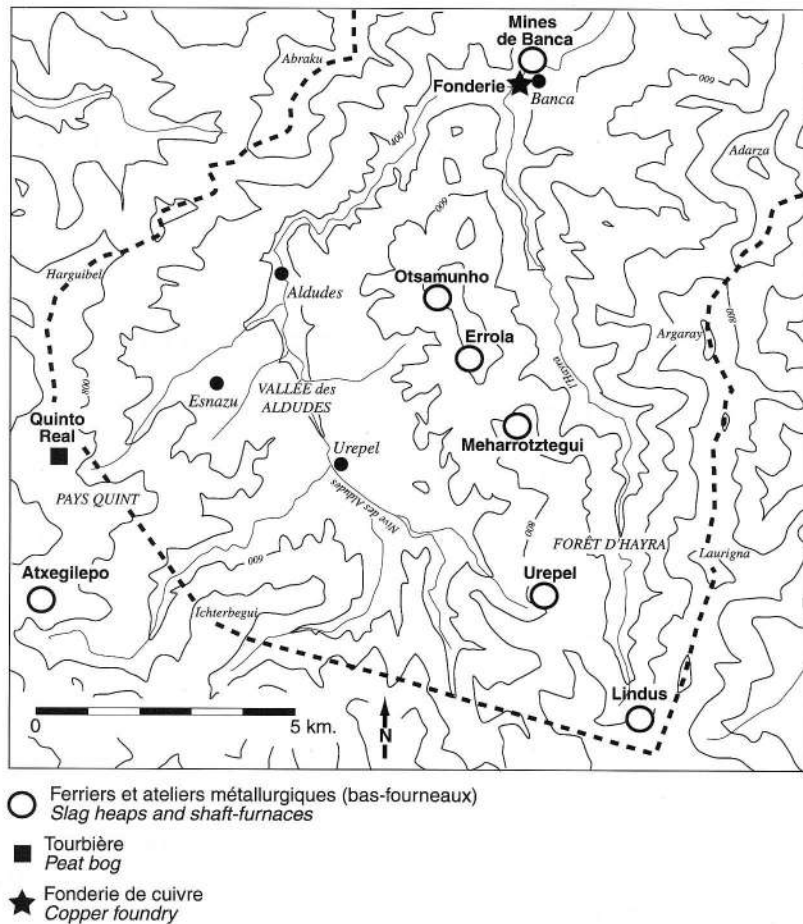


Fig 2 – Localisation des ateliers de réduction antiques et de la tourbière de Quinto Réal.

ques consécutifs à une déforestation massive. C'est pour cette raison que dans ce domaine l'utilisation des techniques isotopiques du plomb s'est développée depuis peu (BRÄNNVALL *et al.* 1997; ROSMAN *et al.* 1997; SHOTYK *et al.* 1998; DUNLAP *et al.* 1999; BINDLER *et al.* 1999; RENBERG *et al.* 2000; MONNA *et al.* 2000a). En effet le plomb possède des caractéristiques uniques qui le rendent particulièrement bien adapté à cette recherche (FAURE 1986; KRAMERS, TOLSTIKHIN 1997). Il est composé de quatre isotopes stables: ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb . Le premier de ces isotopes (^{204}Pb) n'est pas radiogénique, c'est-à-dire qu'il n'est pas issu de la désintégration d'un isotope radioactif. Son abondance est donc restée identique depuis la formation de la Terre. Les trois autres isotopes (^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb) sont produits de façon continue au cours du temps par la désintégration d'isotopes radioactifs: ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th . Pour simplifier, lors de la ségrégation d'une minéralisation, en général sulfurée comme la ga-

lène, le plomb est isolé de ses isotopes pères (U et Th); sa composition isotopique s'en trouve "gelée"; elle n'évolue plus à partir de la cristallisation. À l'opposé, dans les roches et les sols, la production en plomb radiogénique continue en présence d'isotopes pères. Bien que cela ne soit pas toujours vrai, les minéralisations sont donc souvent moins radiogéniques que les terrains encaissants. Il est alors possible de distinguer un plomb issu de l'érosion du substratum de celui remobilisé par l'homme dans l'environnement à la suite des pratiques minières ou métallurgiques.

2. Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude et sondage

La tourbière de Quinto Real se trouve en Espagne, dans la haute vallée des Aldudes, à une altitude de 910 m (Fig. 2). Il s'agit d'une tourbière

active topogène d'une superficie inférieure à un hectare permettant un enregistrement local de la pluie pollinique (JACOBSON, BRADSHAW 1981). Le gisement est installé en amont du bassin versant de la Nive des Aldudes, dans une dépression située en avant d'un bourrelet dont l'origine semble héritée des processus de solifluxion ayant affecté le versant nord-est du massif d'Ocoro (VIERS 1960). L'environnement immédiat est dominé par des pelouses pastorales et par des lambeaux de hêtraie; tandis qu'à plus basse altitude, à partir de 700 m, les formations arborées sont majoritairement composée par des forêts claires (forêt-parcs) de chênes (*Quercus pedunculata*) et de châtaigniers (*Castanea sativa*). Une carotte de 420 cm a été prélevée à l'aide d'un carottier manuel (type GIK) de 8 cm de diamètre en vue de son étude géochimique et pollinique. La stratigraphie, relativement homogène, est détaillée sur le diagramme pollinique (Fig. 4). Le seul changement lithologique noté dans ce profil essentiellement organique et tourbeux est constitué par une passée argileuse surmontée d'un horizon sableux entre les profondeurs 314 et 358 cm.

2.2 Échantillonnages et analyses

L'étude du contenu sporo-pollinique de cette séquence est pour l'instant réalisée à une résolution moyenne : le pas d'échantillonnage étant en moyenne de 4 cm pour le mètre supérieur, et de 8 cm sur le restant du profil. Chaque spectre pollinique a été établi à partir d'une somme pollinique totale supérieure à 500 grains, exclusion faite de l'aulne (JANSSEN 1959), des spores et des taxons hygrophiles (*Cyperaceae*, *Ranunculaceae*). Les résultats de l'analyse ont permis d'établir un diagramme pollinique (Fig. 4) dont nous présentons ici les courbes des principales essences forestières et des herbacées indicatrices des activités humaines (cfr. nitrophiles, rudérales et plantes cultivées). Les 56 échantillons destinés à l'analyse géochi-

mique, ont été quant à eux prélevés à des pas plus ou moins régulier. Ils ont été séchés à l'étuve à 50°C pendant trois jours, puis broyés dans un mortier en agathe. La perte au feu qui permet d'obtenir une information rapide sur la teneur en matière organique a été déterminée à partir d'un gramme de tourbe sèche après passage dans un four en silice, maintenu à 500°C pendant quatre heures. Les teneurs élémentaires en scandium et en plomb ont été déterminées respectivement par activation neutronique instrumentale (Actlabs, Ontario), et par ICP-MS HP 4500 à l'Institut F.-A. Forel – Université de Genève après attaque totale (MONNA *et al.* 2000a). Les compositions isotopiques en Pb ont également été déterminées à l'aide de l'ICP-MS HP 4500 selon la procédure décrite dans MONNA *et al.* 1998, MONNA *et al.* 2000b.

2.3 Datations radiocarbone

Cinq datations ont été réalisées sur de très faibles épaisseurs de sédiment tourbeux (Tab. 1). Trois ont fait l'objet de mesures conventionnelles au laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de Lyon, tandis que deux échantillons ont été datés par AMS par le laboratoire Beta Analytic Inc de Miami. Les dates obtenues ont été calibrées à l'aide du logiciel Calib 4.3. (STUIVER *et al.* 1998). Une interpolation linéaire réalisée à partir de ces datations (GALOP *et al.* 2001), révèle à la fois la régularité mais aussi un taux de sédimentation moyen important, proche du millimètre/an. En raison de sa dilatation, la séquence de Quinto Réal représente au niveau pyrénéen un enregistrement exceptionnel permettant des analyses à haute résolution.

Les estimations des âges établies sur la base des taux de sédimentation entre chaque niveau daté a permis la constitution d'un diagramme pollinique synthétique sur un échelle chronologique (Fig. 5).

Échantillon	profondeurs	matériel	âge 14C BP (2 sigma)	âge calibré AD/BC(2 sigma)
Beta-156998	70	tourbe	290 ± 40	1486 (1640) 1664 cal AD
Ly-10587	157-159	tourbe	1895 ± 50	3 (88, 100, 125) 240 cal AD
Ly-10588	229-231,5	tourbe	2645 ± 45	896 (804) 787 cal BC
Ly-10589	283-285	tourbe	3045 ± 70	1485 (1368, 1362, 1315) 1051 cal BC
Beta-156997	357	tourbe	4120 ± 40	2876 (2662, 2646, 2625) 2501 cal BC

2.4 Quelle signification donner aux signaux géochimiques?

Avant de tirer des conclusions des signaux géochimiques observés dans la colonne de tourbe, il est nécessaire de s'intéresser à leur signification réelle. Ce qui revient en d'autres termes à s'assurer que le plomb n'a pas migré suite à des processus propres à l'évolution de la matière organique, et que son évolution en profondeur reflète essentiellement l'histoire des apports atmosphériques.

Il est communément admis qu'avec des teneurs en matière organique bien inférieures à 90%, les apports en éléments métalliques ne s'effectuent pas uniquement par dépôts atmosphériques, mais aussi en partie par transferts aqueux latéraux et/ou basaux depuis le substratum (SHOTYK 1996a; SHOTYK 1996b). La tourbière peut donc être qualifiée de minérotrophe, à l'opposé du type ombrogène presque exclusivement organique et isolé des apports venant du substratum. En outre, le plomb ayant un fort pouvoir complexant avec la matière organique (FISHER *et al.* 1992), on peut raisonnablement s'interroger sur la bonne conservation de l'enregistrement dans les niveaux les plus détritiques observés autour de 315 cm, mais aussi dans ceux situés vers 140 et 80 cm. Deux questions se posent alors :

- ces distributions résultent-elles d'une migration verticale, auquel cas elles ne sont plus interprétables en termes historiques?
- et ensuite, si le signal atmosphérique est convenablement préservé dans la tourbière, comment l'isoler de celui provenant du substratum?

Sans fournir de réponses définitives, un examen attentif des courbes (Fig. 3) offre plusieurs indices. Si le plomb apporté par l'atmosphère avait migré verticalement vers des zones riches en matière organique où il se serait finalement stabilisé, il devrait présenter de fortes corrélations avec cette dernière. Or ce n'est jamais le cas, sauf dans la partie basale (290 à 414 cm). Au contraire, les pics apparaissent indépendamment des enrichissements en matière organique, comme celui identifié vers 150 cm qui est même associé à une zone plutôt terrigène.

La zone enrichie en surface et celle localisée vers 150 cm sont peu développées alors que si elles avaient été affectées par une migration

après le dépôt on pourrait s'attendre à un étalement important par effet de pénétration, voire même à une homogénéisation d'une partie du profil. La redistribution élémentaire par les plantes à travers la colonne de tourbe peut aussi être raisonnablement écartée, comme en témoigne la faible amplitude du niveau sévèrement pollué dans la partie sommitale.

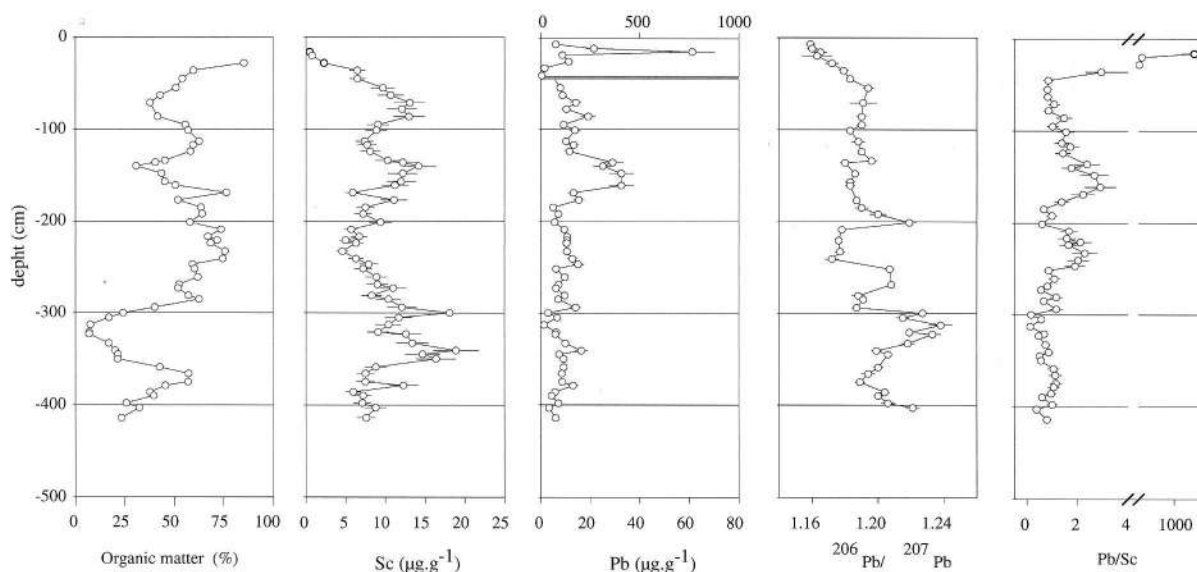
Excepté les horizons situés entre 290 et 414 cm qui méritent une attention particulière, puisque les concentrations de plomb y suivent assez étroitement celles de la matière organique, il paraît raisonnable de penser que le signal atmosphérique n'a pas subi de réelles perturbations tout au moins dans les trois premiers mètres. Ceci va dans le sens d'une étude récente (ALFONSO *et al.* 2001), qui démontre qu'au moins depuis l'Antiquité les apports atmosphériques en plomb sont correctement conservés dans un marais côtier d'Aquitaine très peu organique.

Demeure néanmoins le problème lié à la discrimination du signal naturel face aux apports atmosphériques d'origine anthropique. Les variations des teneurs en plomb pourraient-elles s'expliquer par de simples changements de régimes détritiques ? Pour répondre à cette question, nous disposons de deux outils géochimiques puissants : les rapports Pb/Sc et $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$.

Le scandium est un métal qui ne présente pas d'origine anthropique significative. Comme le zirconium ou le thorium, il est très peu soluble puisque ses formes oxydées résistent particulièrement bien à l'érosion chimique (SHOTYK 1996b). Le plomb naturel associé aux aluminosilicates du substratum, qui s'incorpore ensuite à la tourbière par apports détritiques, devrait donc se trouver corrélé au scandium. C'est pourquoi la normalisation Métal/Sc permet de s'affranchir des variations naturelles liées aux apports détritiques. Une élévation du rapport Pb/Sc indique donc un excès en plomb par rapport aux teneurs du substratum, soit, en d'autres termes, un apport anthropique.

En complément, et selon les principes exposés précédemment, le plomb anthropique ne devrait pas posséder les mêmes caractéristiques isotopiques que le substratum. Dans la carotte de Quinto Real, les rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ les plus radiogéniques avoisinent 1,22-1,24. De telles valeurs sont tout à fait semblables à celles reportées en plusieurs occasions pour caractériser le pôle naturel en Europe de l'Ouest (GROU-

Quinto Réal - 910 m. (Baigorri valley ; Navarra-Spain)

Fig 3 – Teneurs en matière organique, scandium, plomb et rapport isotopiques $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ et Pb/Sr.

SET *et al.* 1994; MOOR *et al.* 1996; SHOTYK *et al.* 1998). En somme, une augmentation des rapports Pb/Sc associée à une baisse simultanée des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ atteste d'une intensification des apports atmosphériques d'origine anthropique.

3. Les évidences d'une activité métallurgique plurimillénaire

3.1 Premières pollutions et premières métallurgies protohistoriques

3.1.1 L'HYPOTHÈSE D'UNE PREMIÈRE MÉTALLURGIE CHALCOLITHIQUE

À la base de l'enregistrement (QR1 et QR2), les données polliniques reflètent l'existence d'un environnement forestier dominé par le chêne (*Quercus*) et le noisetier (*Corylus*), mais dans lequel on peut noter des indices polliniques d'activités agro-pastorales. Ainsi, la présence de pollens de céréales (*Cerealia-type*, *Triticum-type*), de *Plantago lanceolata* et l'élévation des composées héliophiles (*Cichorioideae*, *Asteroidae*) traduisent une anthropisation certaine de ce secteur vers 4000 BC selon nos estimations chronologiques.

Vers 3400 BC, la zone QR3 indique quant à elle une augmentation conséquente de la pression anthropique. Elle se manifeste par une

nette élévation des plantains (*Plantago lanceolata*, *Plantago sp.*), des oseilles (*Rumex*) et par les occurrences régulières des céréales; tandis que le recul progressif des fréquences du chêne et la hausse du bouleau (*Betula*) suggèrent une ouverture du milieu forestier favorable à l'extension de la fougère-aigle (*Pteridium*). La présence du mélampyre (*Melampyrum*) semble également indiquer l'existence d'essartages (abattis-brûlis) (IVERSEN 1949; MOORE *et al.* 1986).

Ces déboisements sont certainement en partie responsables des processus d'érosion et d'une modification du régime sédimentaire enregistrées dans la stratigraphie en QR3b. Cet épisode sédimentaire est également révélé par les faibles teneurs en matières organiques, par l'augmentation consécutive du scandium et, enfin, par les compositions isotopiques en plomb ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1,22-1,24$) qui désignent sans équivoque du plomb issu du substratum. Si l'évolution du plomb durant cette phase est significative, cela semble indiquer que les déforestations enregistrées dans la zone QR3b ne sont pas à mettre en relation avec l'activité métallurgique, mais davantage avec une extension des espaces agro-pastoraux.

C'est dans ce contexte fortement anthropisé que l'on observe la première anomalie géochimique. Centrée sur la zone QR3a, on note une augmentation des rapports Pb/Sc qui coïncide

avec une diminution des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Bien qu'il faille garder à l'esprit les réserves émises précédemment quant à la signification du signal géochimique dans ces niveaux, ces variations pourraient être la conséquence d'activités extractives et/ou métallurgiques aux environs de 3200 BC et qui, par conséquent pourraient être l'indice des premières manifestations d'activité métallurgique atlantique en Europe occidentale. Ces pollutions témoigneraient de l'existence d'une métallurgie à l'extrémité occidentale de la chaîne des Pyrénées entre la fin du IV^e et la première moitié du III^e millénaire av. J.-C. Même si les recherches dans ce domaine n'en sont qu'à leur début, c'est précisément durant cette période que semble s'opérer en France du Sud un décollage des productions métalliques autochtones (GUILAINE 1997; AMBERT 1997). Deux éléments supplémentaires viennent s'ajouter à cette coïncidence chronologique: d'une part, l'existence de gisements cuprifères dans la vallée (chalcopyrite à Banca) qui pourrait avoir conditionné l'émergence d'une métallurgie du cuivre opportuniste en association avec une importante utilisation agro-pastorale de la montagne; d'autre part le fait qu'une anomalie similaire dans le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ait été enregistrée dans les sédiments d'un marais côtier du Médoc, sensiblement à la même date vers 4400 ± 70 BP, soit entre 3346 et 2884 cal BC (ALFONSO *et al.* 2001).

En dépit de ce faisceau convergent d'indices, des doutes persistent et nous empêchent de conclure. Ainsi, il est fort probable que l'existence d'un horizon détritique situé vers 320 cm puisse avoir fortement facilité la migration du plomb vers les horizons sous-jacents. D'autre part, à l'inverse d'autres régions, les données archéologiques restent muettes et aucun objet métallique n'est associé à des contextes du Néolithique final. Les premiers objets en cuivre mis au jour en Pays basque nord l'ont été en contexte campaniforme, ou se rapportent typologiquement à cette période: la fin du III^e millénaire avant J.-C.

3.1.2 DES SIGNAUX CLAIRS DE MÉTALLURGIE PROTOHISTORIQUE

Par la suite, les zones QR5 et QR7 sont identifiées comme des périodes d'activités métallurgiques et/ou minières en raison d'une augmentation significative du rapport Pb/Sc et de l'importante baisse des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Ces deux

épisodes, respectivement datés 3045 ± 70 BP et 2645 ± 45 BP se situent respectivement entre 1642 et 1282 avant J.-C. et entre 1033 et 522 avant J.-C. Ils couvrent une période allant du Bronze moyen médocain à la première moitié de l'Âge du Fer (Fig. 5).

Durant ces phases, le synchronisme entre les données géochimiques et les connaissances générales relatives à la métallurgie sont remarquables. En effet, c'est entre les XIV^e-XV^e siècle av. J.-C. que les productions métalliques s'intensifient dans les zones atlantiques du sud de la France (COFFYN *et al.* 1995); tandis que la deuxième phase, calée autour de 800 avant J.-C., correspond à une phase reconnue de reprise dans la production des objets métalliques (ateliers de fondeurs, objets de prestige, échanges commerciaux vers la Méditerranée). Bien évidemment, il est encore prématuré de vouloir systématiquement attribuer une origine locale à ces signatures géochimiques principalement en raison de l'indigence des données archéologiques actuelles. Toutefois les premiers résultats d'une analyse géochimique plus poussée démontrent que la source de ces paléopollutions reste d'origine locale ou régionale (MONNA *et al.* in prep). Les dynamiques environnementales enregistrées localement fournissent à ce sujet quelques indications convergentes.

Les données polliniques montrent ainsi une coïncidence entre ces deux phases d'activités minières et/ou métallurgiques et des évidences d'ouverture du milieu forestier. Dans la zone QR5, la diminution des valeurs du chêne, du noisetier et, dans une moindre mesure, du hêtre (*Fagus*) est associée à une élévation des fréquences polliniques du bouleau et des Poacées. De même, durant la phase QR7 des signaux de déforestation sont perceptibles par un recul du chêne, du bouleau ainsi que par la hausse de certaines héliophiles, telle que la callune (*Calluna*). Dans les deux cas, et cela semble paradoxal, les indices polliniques d'activités agro-pastorales (*Plantago lanceolata*, *Plantago major/media*, *Melampyrum*, *Rumex*) sont faiblement représentés ou en régression par rapport aux périodes précédentes. Cette caractéristique est nette dans la zone QR7 (entre 1000 et 500 avant J.-C.), durant laquelle les indices polliniques d'agriculture disparaissent, à l'exception des orties (*Urtica*) et des plantains qui témoignent du maintien d'une fréquentation pastorale. Il ressort que des déboisements, quoi-

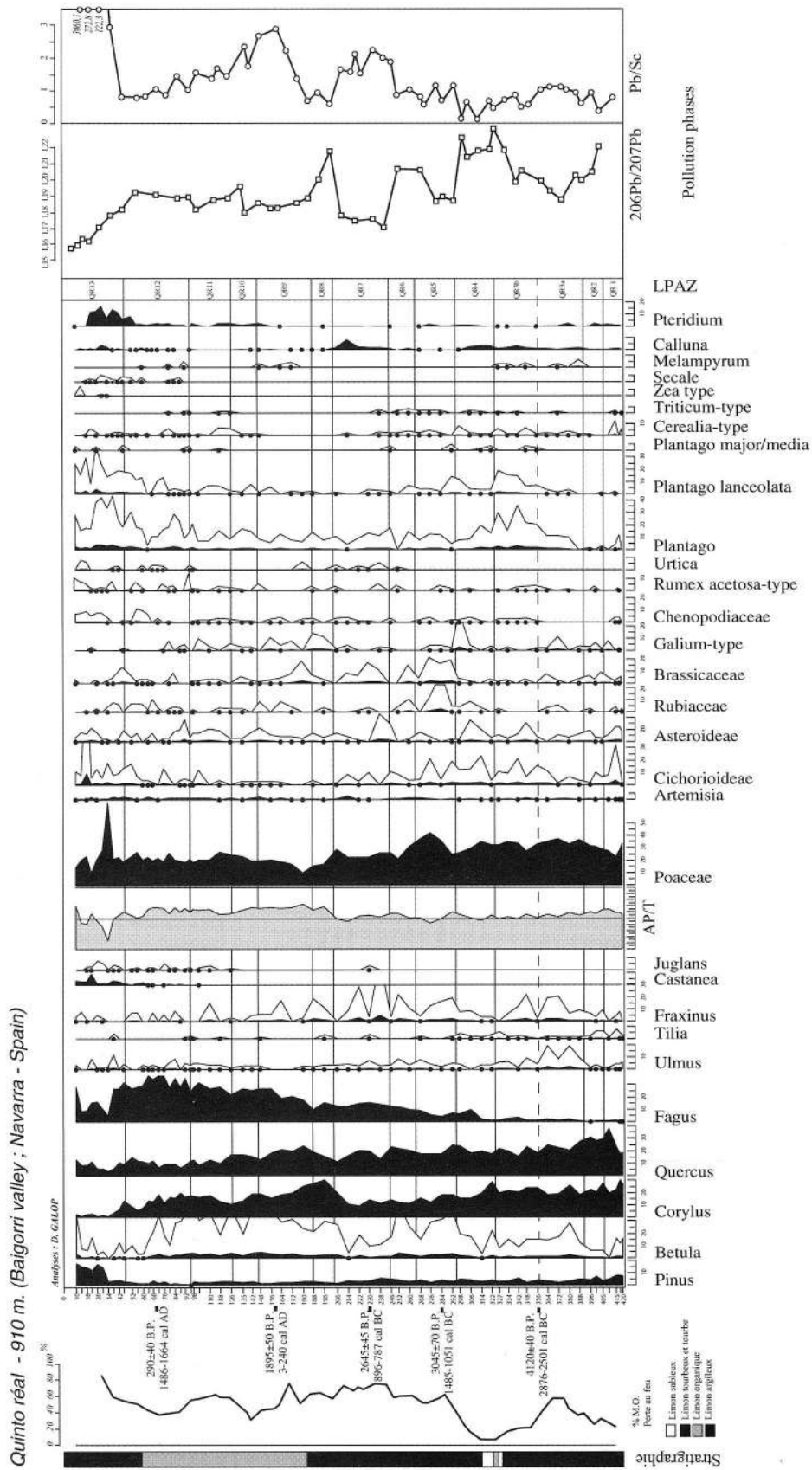


Fig 4 - Diagramme pollinique simplifié de Quinto Réal.

que modérés, ont été réalisés aux environs du site dans des contextes de faible pression, voire de déprise agro-pastorale. Par conséquent, il paraît raisonnable d'envisager d'autres causes pour expliquer cette réduction de la forêt et l'éventualité de prélèvements destinés aux activités métallurgiques peut être formulée. Les évidences d'exploitation des ressources forestières liées à des activités de transformations sont encore peu nombreuses pour des périodes aussi anciennes, mais deux cas semblables ont été repérés dans le Jura entre la fin de l'Âge du Bronze et l'Âge du Fer en connexion avec une exploitation saline (GAUTHIER 2001; DUFRAISSE *et al.* sous presse), ou métallurgique (RICHARD, ESCHENLHOR 1998). D'autres éléments sont à verser au crédit de cette hypothèse, en particulier les indices de reforestation enregistrés entre ces deux périodes d'activités, lors des phases QR6 et QR8. Ces deux zones sont caractérisées par une hausse du chêne, du hêtre et des arbres recolonisateurs (bouleau et le noisetier), ainsi que par une diminution des Poacées qui suggère une diminution des espaces ouverts. Ces phases correspondent systématiquement avec une baisse du rapport Pb/Sc et une augmentation du rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ qui signalent un affaiblissement des activités extractives et/ou métallurgiques. Un lien direct entre activités minières/métallurgiques et dynamique de la couverture forestière locale semble donc exister, ce qui renforce l'éventualité d'activités métallurgiques ou extractives localisées dans cette partie de la haute vallée des Aldudes. Une estimation chronologique fondée sur les taux de sédimentation indique que ces périodes de régénération forestière et de ralentissement des activités métallurgiques se situeraient entre 1300-1000 avant J.-C. et 500-300 avant J.-C. (Fig. 5). Pour partie, ces résultats vont dans le sens des données archéologiques régionales qui indiquent un ralentissement des productions métalliques en Aquitaine vers 1100 avant J.-C. (CANTET 1991).

3.2 Une accélération des activités métallurgiques durant l'Antiquité

Dans les zones QR9 et QR10, les données géochimiques signalent une nouvelle hausse du rapport Pb/Sc concomitante avec une diminution du rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Ces pollutions confirment l'existence d'activités extractives et/ou

métallurgiques dans la région. Parallèlement, les données paléobotaniques reflètent une reprise des déforestations qui affectent le chêne et le noisetier, tandis que le hêtre semble au contraire s'étendre. L'ouverture du milieu est confirmée par une légère augmentation des Poacées, par l'extension du bouleau, ainsi que par la présence de *Melampyrum* qui pourrait indiquer l'existence de faciès incendiés. Là encore, comme pour les phases antérieures, les signes d'une réduction de la forêt apparaissent sans qu'aucun indice pollinique ne traduise la présence d'activités culturelles (QR9). Seules les faibles représentations de *Plantago lanceolata* attestent d'une anthropisation modérée du milieu. Les premiers indicateurs cultureux (*Cerealia*-type) n'apparaissent que dans la zone QR 10, à la fin de cette période, durant le III^e siècle.

Pour cet épisode, la datation obtenue place le maximum de l'activité métallurgique au début de notre ère. Après calibration, les pics de probabilités le situent précisément entre la fin I^{er} et le début du II^e siècle ap. J.-C. (88, 100, 125 cal AD). Toutefois, d'après nos estimations chronologiques, le démarrage de ces activités s'effectuerait plus tôt, dès le III^e siècle avant J.-C., soit à la fin de l'Âge du Fer (Fig. 5). Ces données sont en parfait accord avec les évidences archéologiques et dendrochronologiques d'activités minières et métallurgiques antiques attestées à Banca (MACHOT 1995; PARENT 1997; ANCEL 1999; ANCEL 2000; PERRAULT, GIRARCLOS 2001) et celles repérées lors de prospections récentes (BEYRIE 2000; COLLECTIF 1992) dans le bassin d'Urepel, à proximité du site de Quinto Réal (Fig. 2) où les bas-fourneaux d'Errola 3 et 5 ont été datés respectivement, 2040 ± 30 BP (148 cal BC-48 cal AD) ; 2095 ± 30 BP (197-4 cal BC) et 1910 ± 90 BP (50 cal BC-250 cal AD). Rien de surprenant, donc, à voir une signature isotopique aussi nette.

Par contre, l'impact de ces activités sur les forêts reste vraisemblablement encore modéré. Il ne concerne apparemment que le chêne et les formations secondaires de moyenne altitude qui lui sont associées. A l'exception des données polliniques, nous ne disposons encore que de peu d'informations paléobotaniques. Toutefois, les premières analyses anthracologiques réalisées dans les crassiers des bas-fourneaux d'Errola montrent une très nette dominance de charbon de chêne (MOUGIN 2001); tandis que

la majorité des bois extraits des galeries antiques de la mine de Banca est également identifiés comme appartenant à la même essence. Quoique encore mal assurée, l'hypothèse d'un prélèvement sélectif pourrait être avancée.

3.3 Du déclin médiéval à la surexploitation moderne

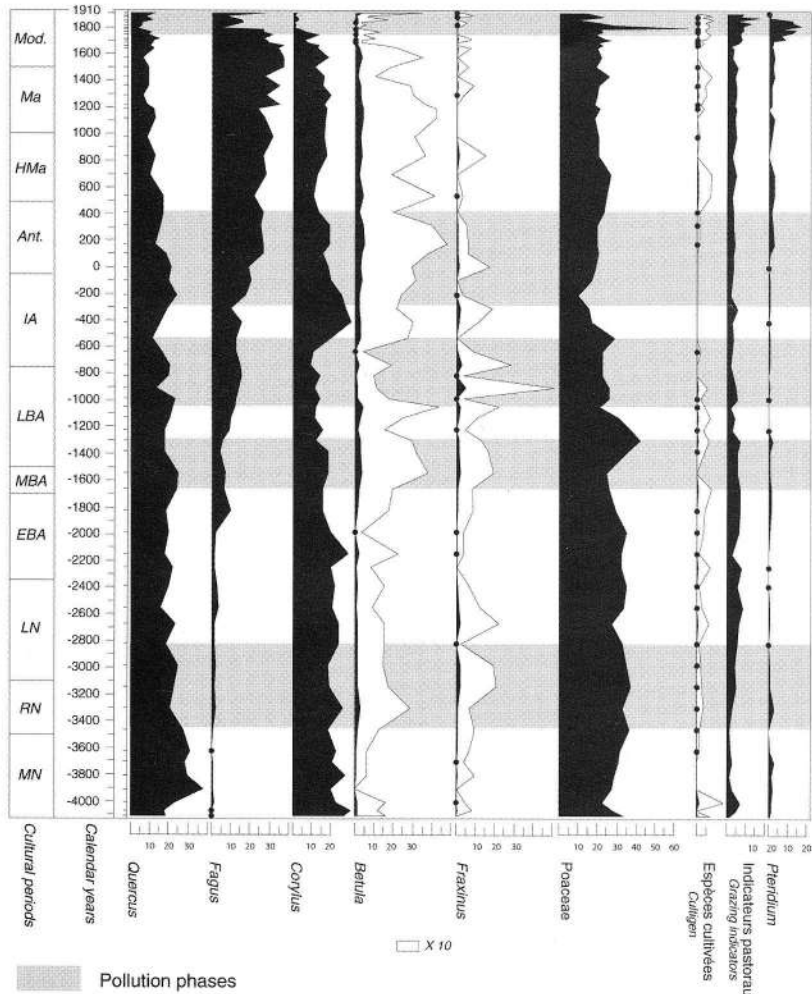
Durant les phases QR11, QR12, la baisse régulière du rapport Pb/Sc et le retour progressif du rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vers des valeurs plus radio-géniques annoncent un ralentissement des activités minières et/ou métallurgiques à partir du IV^e siècle (Fig. 5). Cet affaiblissement local de la métallurgie semble validé par l'archéologie et les sources textuelles. En effet, aucune preuve matérielle, ni mention d'une activité métallurgique médiévale n'ont été découvertes, exception faite d'une datation réalisée dans une galerie de la mine de Banca qui a livré un âge de 985 ± 45 BP (X^e-XII^e siècles). Par contre, durant cette période on peut observer une élévation graduelle des indices polliniques d'activités agro-pastorales (*Plantago*, *Plantago lanceolata*, *Urtica*, *Cerealia*, *Secale*), tandis que le hêtre devient localement dominant et que le chêne recule sous les effets probables d'une extension des défrichements agricoles à plus basse altitude. La zone QR13 marque une rupture importante. La représentation pollinique de l'ensemble des essences forestières (*Fagus*, *Quercus*, *Corylus*) s'effondre et reflète un déboisement important des environs de la tourbière. Cette ouverture de l'espace forestier est également signalée par une hausse des herbacées héliophiles ainsi que par une extension de la callune, tandis que la hausse des valeurs de certains taxons (*Rumex*, *Plantago*, *Chenopodiaceae*, *Cichorioideae*) suggère une intensification locale des pratiques pastorales. Simultanément, le rapport Pb/Sc grimpe en flèche, tandis que le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ chute brutalement. Il est certain que l'essentiel du signal anthropique est local, car les quantités de métal impliquées sont trop importantes pour être le résultat d'un apport atmosphérique de large amplitude. Nous retrouvons dans cette anomalie le décollage de l'activité métallurgique qui caractérise la vallée de Baigorri, et plus largement le Pays basque, à la fin du Moyen Âge (GOYEHENETXE 2001). Nos estimations dans les niveaux immédiatement supérieurs permettent de caler ce démarrage vers 1750, date à laquelle

commence à fonctionner la fonderie de cuivre de Banca (1747). Son activité s'intensifiera jusqu'à la fin du XVIII^e, couplée à une production momentanée de fer à partir du XIX^e siècle. La consommation en charbon de bois nécessaire au fonctionnement de ces établissements était considérable et l'essentiel de l'espace forestier de la vallée était dévolu au charbonnage, tout comme une grande partie des forêts du Pays basque (LEFEBVRE 1933). Le synchronisme entre la déforestation enregistrée par les données pollenanalytiques et cette intensification de la pression métallurgique n'a rien de surprenant, d'autant plus que les vestiges de charbonnières repérés lors des prospections dans les forêts voisines du site traduisent l'intensité des prélèvements destinés à l'alimentation des forges de la vallée. Des travaux sont en cours sur ces sites de charbonnage. Ils devraient confirmer les données textuelles qui indiquent que durant le XVIII^e siècle les forêts du Pays Quint avaient été détruites en totalité pour l'alimentation des forges (HOURMAT 1995), ce qui paraît réaliste lorsque l'on considère la chute drastique du hêtre enregistrée durant cette période (Fig. 4 et 5).

4. Conclusion

Les résultats préliminaires de cette étude consacrée à l'histoire des activités métallurgiques à l'extrémité occidentale des Pyrénées montrent l'opportunité d'une démarche interdisciplinaire intégrant palynologie, géochimie isotopique et données archéologiques. Ils ont d'ores et déjà permis de cerner localement, pour la première fois sur la longue durée, plusieurs grandes phases d'exploitation et de re-plis des activités minières et/ou métallurgiques. Quatre périodes d'exploitation sont clairement identifiées : il s'agit du l'Âge de Bronze moyen médocain (XV^e-XIV^e siècle avant J.-C.); de l'Âge de Bronze final (IX^e siècle avant J.-C.); de la période couvrant fin de l'âge du fer et l'Antiquité (II^e siècle avant J.-C.-IV^e siècle après J.-C.) et enfin, de l'époque moderne à partir du XVIII^e siècle. Ces pics de pollution correspondent bien avec les connaissances archéologiques et historiques sur les activités minières et métallurgiques de la région. Reste le problème de la phase la plus ancienne, qui est contemporaine de la charnière IV^e-III^e millénaire avant notre ère: bien que de nombreux

Quinto Réal - 910 m. (Baigorri valley ; Navarra - Spain)
 Simplified pollen diagram on chronological scale



Cultural periods : MN : Middle Neolithic - RN : Recent Neolithic - LN : Late Neolithic - EBA : Early Bronze Age
 MBA : Middle Bronze Age - LBA : Late Bronze Age - IA : Iron Age - Ant : Antiquity - HMa : High Middle Ages
 Ma : Middle Ages - Mod : Modern and Contemporaneous periods.

Fig 5 – Diagramme pollinique synthétique de Quinto Réal (échelle chronologique).

synchronismes avec des présomptions archéologiques soient remarqués, la géochimie n'est pas en mesure de lever les doutes qui subsistent quant à l'existence de cette phase de pollution atmosphérique. Seuls des résultats obtenus sur une tourbière totalement ombrogène (étude en cours) seront en mesure d'évacuer toute ambiguïté.

En ce qui concerne l'impact de ces activités sur l'environnement, deux points semblent intéressants à souligner:

- d'une part, cette étude met en évidence les premières pollutions proto-industrielles ayant affecté le massif pyrénéen et force est de cons-

tater qu'une grande partie du plomb accumulé dans le réservoir sédimentaire de Quinto Real s'est déposée bien avant l'ère industrielle; - d'autre part, la confrontation entre données géochimiques et polliniques montre qu'à partir de l'Âge du bronze il existe un lien étroit entre les signaux d'activité métallurgique et les déforestations. Sans sous-estimer le poids des prélèvements destinés à la métallurgie ont contribué dès cette époque à la transformation des forêts de cette haute vallée du Pays basque mais sans jamais atteindre l'ampleur qui les caractérise à partir de la fin du Moyen Âge.

Remerciements

Cette recherche a bénéficié du soutien financier du P.C.R. "Paléoenvironnement et dynamique de l'anthropisation en montagne basque", Ministère de la Culture-SRA Aquitaine.

Ce programme participe aux échanges scientifiques entretenus depuis 2000 entre les équipes du Laboratoire de Chrono-Écologie (UMR 6565 du CNRS; Besançon), du GEODE (UMR 5602 du CNRS) et l'équipe du LASA (Genova, Italie). Des travaux com-

parables seront prochainement engagés lors de l'étude inter-équipe de la séquence sédimentaire de Casanova programmée dans le cadre des "Presidi Universitari Internazionali-Ente Parco Antola".

Les auteurs remercient A. Bidart, G. Bossuet, A. Lopez Saez pour leur assistance lors des travaux de terrain; P. Berringer pour les travaux de laboratoire, ainsi que D. Vignati et P.-Y. Favargé (Institut F.-A. Forel), M.-J. Milloux et J. Lévêque (GéoSol) pour leur aide pendant les analyses et leurs précieux commentaires.

Références bibliographiques

- AL-SAA'D Z. 2000, *Technology and provenance of a collection of islamic copper-based objects as found by chemical and lead isotope analysis*, «Archaeometry», 42 (2), pp. 385-397.
- AMBERT P. (dir.) 1996, *Cabrières-Hérault et le contexte régional de la première métallurgie du cuivre en France (III^e millénaire av. J.-C.)*, «Archéologie en Languedoc», 20, 1.
- AMBERT P. 1997 *Recherche sur les fours de métallurgistes Chalcolithiques et de l'âge du bronze d'Europe occidentale (domaines méditerranéen et alpin)*, «Archéologie en Languedoc», 21, pp. 29-44.
- ANCEL B. 1999, *Les mines de cuivre de Banca, Saint-Etienne-de-Baïgorry, Pyrénées Atlantiques*, Rapport de fouille, SRA Aquitaine.
- ANCEL B. 2000, *Les mines de cuivre de Banca, Saint-Etienne-de-Baïgorry, Pyrénées Atlantiques*, Rapport de fouille, SRA Aquitaine.
- BEYRIE A. 2000, *Mines et métallurgies antiques dans les vallées de la Nive et des Aldudes*, Rapport de prospection thématique 2000, SRA Aquitaine.
- BEYRIE A. 2001, *Mines et métallurgie antique du fer dans la vallée des Aldudes. L'exemple de la montagne d'Errola*. Rapport intermédiaire PCR, SRA Aquitaine, pp. 47-57
- BEYRIE A. sous presse, *La métallurgie antique du fer en Labourd et en Basse-Navarre (Pyrénées-Atlantiques)*, in *Extraction et traitements des minerais, de la proto-histoire au XIX^e siècle*, Actes du colloque de Saint-Clément-les-Places (novembre 2001).
- BEYRIE A. sous presse, *Mines et métallurgies antiques du fer en Labourd et en Basse-Navarre (Pyrénées-Atlantiques)*, in *L'artisanat dans l'Antiquité, production, commercialisation et consommation*, 2^e Colloque International sur la romanisation en Pays basque (Vitoria-Gazteiz, 30 novembre-2 décembre 2000).
- BINDLER R., BRÄNNVALL M.-J., RENBERG I., EMTERYD O., GRIP H. 1999, *Natural lead concentrations in pristine boreal forest soils and past pollution trends: a reference for critical load models*, «Environmental Science and Technology», 33, pp. 3362-3367.
- BONHÔTE J. 1992, *Forges à la catalane et évolution forestière dans les Pyrénées de la Haute-Ariège. Pour une histoire de l'environnement*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse-le-Mirail, 425 p.
- BONI M., DI MAIO G., FREI R., VILLA M. 2000, *Lead isotopic evidence for a mixing provenance for roman water pipes from Pompeii*, «Archaeometry», 42 (1), pp. 201-208.
- BOUTRON C. 1995, *Historical reconstruction of the earth's past atmospheric environment from Greenland and Antarctic snow and ice cores*, «Environmental Review», 3, pp. 1-28.
- BOUTRON C., CANDELONE J.-P., HONG S. 1994, *Past and recent changes in the large-scale tropospheric cycles of lead and other heavy metals as documented in Antarctic and Greenland snow and ice: a review*, «Geochimica and Cosmochimica Acta», 58 (15), pp. 3217-3225.
- BRÄNNVALL M.-L., BINDLER R., EMTERYD O., NILSSON M., RENBERG I. 1997, *Stable isotope and concentration records of atmospheric lead pollution in peat and lake sediments in Sweden*, «Water, Air, and Soil Pollution», 100, pp. 243-252.
- BRÄNNVALL M.-L., BINDLER R., RENBERG I., EMTERYD O., BARTNICKI J., BILLSTRÖM K. 1999, *The medieval metal industry was the cradle of modern large-scale atmospheric lead pollution in northern Europe*, «Environmental Science and Technology», 33, pp. 4391-4395.
- CANTET J.-P. 1991, *L'âge du bronze en Gascogne gersoise*, «Archéologies» n° 4, Archéologies Vesuna, 240 p.
- COFFYN A., MOREAU J., BOURIS J.-R. 1995, *Les dépôts de bronze de Soulac-sur-mer*, «Aquitania», 13, pp. 7-31.
- COLLECTIF 1993, *Inventaire diachronique des sites miniers et métallurgiques du Pays basque nord, Labourd*. «Ikartzaleak», 17.
- DAVASSE B. 2000, *Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du Moyen Âge à nos jours. Une approche géographique de l'histoire de l'environnement*, GEODE, 287 p.
- DUBOIS C. 1996, *Métallurgie du fer en Ariège de l'Antiquité au XVII^e siècle. Le point sur les données archéologiques*, P. BENOIT et P. FLUZIN éd., «Paléométagurgie du fer et cultures», pp. 387-396.
- DUBOIS C., GUILBAUT J.-E. 1986, *Les exploitations minières antiques de Rivèrenert et des Abères, commune de Rivèrenert*, in *Les ressources minérales et l'histoire de leur exploitation*, 108^e Congrès des Sociétés Savantes, Paris, pp. 91-116.
- DUBOIS C., MÉTAILLIÉ J.-P., IZARD V. 1998, *Archéologie de la forêt charbonnée: questions et méthodes, illustrées par l'exemple du site de Lercoul (Ariège)*, in *La dynamique des paysages proto-historiques, antiques, médiévaux et modernes*, APCDA, Sophia-Antipolis, pp. 525-540.
- DUFRAISSE A., GAUTHIER E., PÉTREQUIN A.-M., PÉTREQUIN P., WELLER O. sous presse, *Techniques d'exploitation pré-historiques du sel en Franche-Comté et en Bourgogne*, Actes du Congrès SPF (Nanterre, novembre 2000).
- DUNLAP C.E., STEINNES E., FLEGAL A.R. 1999, *A synthesis of lead isotopes in two millennia of European air*, «Earth and Planetary Science Letters», 167, pp. 81-88.

- DUPRÉ E., PARANT D., SAINT-ARROMAN C., TOBIE J.-L. 1992-1993, *Note sur un site minier et métallurgique antique de la commune d'Urepel (Pyrénées-Atlantiques)*, «Cahiers du G.A.P.O.», 12, pp. 91-100.
- FAURE G. 1986, *Principles of isotope geology*, 2nd edition, John Wiley and sons ed.
- FISHER K., RAINER C., BIENIEK D., KETTRUP A. 1992, *Desorption of heavy metals from typical soil components (clay, peat) with glycine*, «Intern. J. Environ. Anal. Chem.», 46, pp. 53-62.
- FRUHAUF C. 1980, *Forêt et société*, CNRS, Paris, 302 p.
- GALOP D. (dir.) 2001, *Paléoenvironnement et dynamiques d'anthropisation de la montagne Basque*, Rapport intermédiaire PCR, SRA Aquitaine, 108 p.
- GALOP D. (dir.) 2000, *Paléoenvironnement et dynamiques d'anthropisation de la montagne Basque*, Rapport intermédiaire PCR, SRA Aquitaine, 108 p.
- GALOP D. (dir.) 1999, *Paléoenvironnement et dynamiques d'anthropisation de la montagne Basque*, Rapport annuel Programme thématique, SRA Aquitaine, 112 p.
- GALOP D. 1998, *La forêt, l'homme et le troupeau dans les Pyrénées. 6000 ans d'histoire de l'environnement entre Garonne et Méditerranée*, GEODE-LET-FRAMESPA, Toulouse, 285 p.
- GALOP D., TUAL M., MONNA F., DOMINIK J., BEYRIE A., MAREMBERT F. 2001, *Cinq millénaires de métallurgie en montagne basque. Les apports d'une démarche intégrée alliant palynologie et géochimie isotopique du plomb*, «Sud-Ouest Européen», 11, pp. 3-15.
- GAUTHIER E. 2001, *Évolution de l'impact de l'homme sur la végétation du massif jurassien au cours des quatre derniers millénaires. Nouvelles données palynologiques*, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 250 p.
- GÖRRES M., FRENZEL B. 1997, *Ash and metal concentrations in peat bogs as indicators of anthropogenic activity*, «Water, Air, and Soil Pollution», 100, pp. 355-365.
- GOYEHENETXE M. 2001, *Histoire générale du Pays basque. Évolution économique et sociale du XVI^e au XVIII^e siècle*, Donostia, Elkarlanean, 411 p.
- GROUSSET F.E., QUÉTEL C.R., THOMAS B., BUAT-MÉNARD P. 1994, *Transient Pb isotopic signatures in the Western European atmosphere*, «Environmental Science and Technology», 28, pp. 1605-1608.
- GUILAINE J. 1997, *Les débuts de la métallurgie du cuivre en Méditerranée occidentale. Questions ouvertes, hypothèses archéologiques*, «Archéologie en Languedoc», 21, pp. 9-16.
- GUILAINE J. 1994, *La mer partagée. La Méditerranée avant l'écriture 7000-2000 avant Jésus-Christ*, Hachette, Paris, 453 p.
- HONG S., CANDELONE J.-P., PATTERSON C.C., BOUTRON C.F. 1994, *Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millenia ago by Greek and Roman civilisation*, «Science», 265, pp. 1841-1843.
- HOURMAT P. 1995, *L'exploitation des mines de cuivre de la vallée de Baïgorry au XVIII^e siècle*, «Mines et établissements métallurgiques de Banca», éd. Izpégi, Baïgorri, pp. 59-100.
- IVERSEN J. 1949, *The influence of prehistoric man on vegetation*, «Danmarks Geol. Unders.», Serie IV, 3, pp. 1-23.
- IZARD V. 1999, *Les montagnes du fer. Éco-histoire de la métallurgie et des forêts dans les Pyrénées méditerranéennes (de l'Antiquité à nos jours). Pour une histoire de l'environnement*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse-le-Mirail, 2 tomes, 560 p. et 192 p.
- JACOBSON G.L., BRADSHAW R.H.W. 1981, *The selection of sites for palaeoecological studies*, «Quaternary Research», 16, pp. 80-96.
- JANSSSEN C.R. 1959, *Alnus as a disturbing factor in pollen diagrams*, «Acta Bot. Neerland», 8, pp. 55-58.
- KEMPTER H., FRENZEL B. 2000, *The impact of early mining and smelting on the local tropospheric aerosol detected in ombrotrophic peat bogs in the Harz, Germany*, «Water, Air and Soil Pollution», 121, pp. 93-108.
- KEMPTER H., FRENZEL B. 1999, *The local nature of anthropogenic emissions sources on the elemental content of nearby ombrotrophic peat bogs, Vulkaneifel, Germany*, «The Science of the Total Environment», 241, pp. 117-128.
- KEMPTER H., GÖRRES M., FRENZEL B. 1997, *Ti and Pb concentrations in rainwater-fed bogs in Europe as indicators of past anthropogenic activities*, «Water, Air, and Soil Pollution», 100, pp. 367-377.
- KRAMERS, J.D., TOLSTIKHIN, I.N. 1997, *Two terrestrial lead isotope paradoxes, forward transport modelling, core formation and the history of the continental crust*, «Chemical Geology», 139, pp. 75-110.
- LEFEVRE T. 1933, *Les modes de vie dans les Pyrénées atlantiques orientales*, Paris, Armand Colin, 777 p.
- MACHOT P. 1995, *Mines et établissements métallurgiques de Banca*, Éditions Izpégi, Biarritz/Saint-Etienne-de-Baïgorry, 406 p.
- MACKENZIE A.B., LOGAN E.M., COOK G.T., PULFROD I.D. 1998, *A historical record of atmospheric depositional fluxes of contaminants in west-central Scotland derived from an ombrotrophic peat core*, «The Science of the Total Environment», 222, pp. 157-166.
- MARTINEZ-CORTIZAS A., PONTEVEDRA-POMBAL X., NOVOA-MUNÓZ J.C., GARCIA-RODEJA E. 1997, *Four thousand years of atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorded by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (Northwestern Spain)*, «Water, Air and Soil Pollution», 100, pp. 387-403.
- MIGHALL T.M., ABRAHAMS P.W., GRATTAM J.P., HAYES D., TIMBERLAKE S., FORSYTH S. sous presse, *Geochemical evidence for atmospheric pollution derived from prehistoric copper mining at Copa Hill, Cwmystwyth, mid-wales, UK*, «The Science of Total Environment».
- MONNA F., GALOP D., CAROZZA L., TUAL M., BEYRIE A., MAREMBERT F., DOMINIK J. in prep., *Impact of local early metalworking in the basque country pointed out by geochemical and pollen records in minerotrophic peat bog*.
- MONNA F., HAMER K., LÉVÊQUE J., SAUER M. 2000a, *Pb isotopes as reliable marker of early mining and smelting in the Northern Harz province (Lower Saxony, Germany)*, «Journal of Geochemical Exploration», 68, 3, pp. 201-210.
- MONNA F., LOIZEAU J.-L., THOMAS B., GUEGEN C., FAVARGER P.-Y., LOSNO R., DOMINIK J. 2000b, *Noise identification and sampling frequency determination for precise isotopic measurements by quadrupole-based Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, «Analysis», 28, pp. 750-757.
- MONNA F., LOIZEAU J.-L., THOMAS B.A., GUEGEN C., FAVARGER P.-Y. 1998, *Pb and Sr isotope measurements*

- by inductively coupled plasma-mass spectrometer: efficient time management for precise improvement, «Spectrochim. Acta», part B. 59, pp. 1317-1333.
- MOOR H.C., SCHALLER T., STURM M. 1996, *Recent changes in stable lead isotope ratios in sediments of lake Zug, Switzerland*, «Environmental Science and Technology», 30, pp. 2928-2933.
- MOORE P.D., EVANS A.R., CHATER M. 1986, *Palynological and stratigraphic evidence for hydrological changes in mires associated with human activity*, in BEHRE K.-E. (ed.), *Anthropogenic indicators in pollen diagrams*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 209-220.
- MOUGIN V. 2001, *Premières données anthracologiques sur la haute vallée des Aldudes*, Rapport intermédiaire PCR, SRA Aquitaine, pp. 59-62.
- MUNKSGAARD N.C. and PARRY D.L. 1998, *Lead isotope ratios determined by ICP-MS: Monitoring of mining-derived metal particulates in atmospheric fallout, Northern Territory, Australia*, «The Science of the Total Environment», 217, pp. 113-125.
- MUT G., PINÉDA J., SIRET A. 1984-1985, *Mines et fonderies antiques et médiévales du Canigou (région Est)*, Mémoire de maîtrise, Université de Toulouse-le-Mirail.
- PARENT G. 1997, *L'exploitation du cuivre et de l'argent à Banca*, in *Mélanges Claude Domergue*, «Pallas, revue d'études antiques», 46.
- PERRAULT C., GIRARCLOS O. 2001, *Etude dendrochronologique des bois de la mine de Banca*, Rapport intermédiaire PCR, SRA Aquitaine, pp. 41-45.
- RENBORG I., BRÄNNVALL M.-L., BINDLER R., EMTERYD O. 2000, *Atmospheric lead pollution history during four millennia (2000 BC to 2000 AD) in Sweden*, «Ambio», 29, pp. 150-156.
- RICHARD H., ESCHENLHOR L. 1998, *Essai de corrélation entre les données polliniques et les données archéologiques: le cas des forêts de Lajoux dans les Franches-Montagnes (Lajoux, Suisse)*, «Revue d'Archéométrie», 22, pp. 29-37.
- ROSMAN K., CHISHOLM W., HONG S., CANDELONE J.-P., BOUTRON C. 1997, *Lead from Carthaginian and Roman Spanish mines isotopically identified in Greenland ice dated from 600 B.C. to 300 AD*, «Environmental Science and Technology», 31, pp. 3413-3416.
- SCHETTLER G., ROMER R.L. 1998, *Anthropogenic influences on Pb/Al and lead isotope signature in annually layered Holocene Maar lake sediments*, «Applied Geochemistry», 13 (6), pp. 787-797.
- SHORTLAND A.J., NICHOLSON P.T., JACKSON C.M. 2000, *Lead isotopic analysis of eighteenth-dynasty Egyptian eye-paints and lead antimonate colourants*, «Archaeometry», 42 (1), pp. 153-157.
- SHOTYK W. 1996a, *Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura mountains, Switzerland*, «Water, Air and Soil Pollution», 90, pp. 375-405.
- SHOTYK W. 1996b, *Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentrations, and metal enrichment factors*, «Environ. Rev», 4, pp. 149-183.
- SHOTYK W., CHEBURKIN A.K., APPLEBY P.G., FANKHAUSER A., KRAMERS J.D. 1996, *Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony and lead deposition recorded in an ombrotrophic peat bog profile, Jura mountains, Switzerland*, «Earth and Planetary Science Letters», 145, E1-E7.
- SHOTYK W., WEISS D., APPLEBY P.G., CHEBURKIN A.K., FREI R., GLOOR M., REESE S., VAN DER KNAAP W.O. 1998, *History of atmospheric lead deposition since 12,370 14C yr BP from a peat bog, Jura mountains, Switzerland*, «Science», 281, pp. 1635-1640.
- SHOTYK W., BLASER P., GRÜNIG A., CHEBURKIN A.K. 2000, *A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat cores from bogs: Pb in eight Swiss peat bog profiles*, «The Science of the Total Environment», 249, pp. 281-295.
- SNOEK W., PLIMER I.R., REEVES S. 1999, *Application of Pb isotope geochemistry to the study of the corrosion products of archaeological artefacts to constrain provenance*, «Journal of Geochemical Exploration», 66, pp. 421-425.
- STOS-GALE Z., GALE N.H., HOUGHTON J., SPEAKMAN R. 1995, *Lead isotope data from the isotope laboratory, Oxford: Archaeometry data base 1, ores from the Western Mediterranean*, «Archaeometry», 37 (2), pp. 407-415.
- STUIVER M., REIMER P.J., BARD E. et al. 1998a, «Radiocarbon», 40, pp. 1041-1083.
- VAN GEEL B., BREGMAN R., VAN DER MOLEN P.C., DUPONT L.M., VAN DRIEL-MURRAY C. 1989, *Holocene raised bog deposits in the Netherlands as geochemical archives of prehistoric aerosols*, «Acta Bot. Neerl.», 38, 4, pp. 467-476.
- VERNA C. 1994, *Le temps des moulins. Le fer et son exploitation du comté de Foix à la Vicomté de Béarn (fin du XII^e siècle-fin du XV^e siècle)*, Thèse de Doctorat, Université Paris I, 2 vol., 495 p. et 196 p.
- VIERS G. 1960, *Le relief des Pyrénées occidentales et de leur piémont. Pays basque français et Baretous*, Toulouse, Privat, 594 p.
- WEISS D., SHOTYK W., CHEBURKIN A.K., GLOOR M., REESE S. 1997, *Atmospheric lead deposition from 12,400 to 2,000 yrs. BP in a peat bog profile, Jura mountains, Switzerland*, «Water, Air, and Soil Pollution», 100, pp. 311-324.