



Quaternaire

Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire

vol. 18/3 | 2007
Volume 18 Numéro 3

Les variations paléoenvironnementales de 1000 avant à 1000 après J.C. et la question des « optima » climatiques de l'Antiquité tardive et du Moyen Âge sur le piémont des Alpes du nord à Colletière, lac de Paladru, France

Paleoenvironmental variations from 1000 BC to 1000 AD and late Antiquity and medieval climatic optima on northwestern Alps piedmont at Colletière, Paladru lake, France

Jacques-Léopold Brochier, Jean-Luc Borel et Jean-Claude Druart



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/1125>

DOI : 10.4000/quaternaire.1125

ISSN : 1965-0795

Éditeur

Association française pour l'étude du quaternaire

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2007

Pagination : 253-270

ISSN : 1142-2904

Référence électronique

Jacques-Léopold Brochier, Jean-Luc Borel et Jean-Claude Druart, « Les variations paléoenvironnementales de 1000 avant à 1000 après J.C. et la question des « optima » climatiques de l'Antiquité tardive et du Moyen Âge sur le piémont des Alpes du nord à Colletière, lac de Paladru, France », *Quaternaire* [En ligne], vol. 18/3 | 2007, mis en ligne le 01 septembre 2010, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/1125> ; DOI : 10.4000/quaternaire.1125

LES VARIATIONS PALÉOENVIRONNEMENTALES DE 1000 AVANT À 1000 APRÈS J.C. ET LA QUESTION DES « OPTIMA » CLIMATIQUES DE L'ANTIQUITÉ TARDIVE ET DU MOYEN ÂGE SUR LE PIÉMONT DES ALPES DU NORD À COLLETIÈRE, LAC DE PALADRU, FRANCE



Jacques-Léopold BROCHIER¹, Jean-Luc BOREL² & Jean-Claude DRUART³

RÉSUMÉ

L'étude pluridisciplinaire (sédimentologie, analyse d'image à l'ordinateur, algologie, palynologie) conduite sur une séquence microlaminée de craies lacustres, prélevée sur le site archéologique médiéval immergé de Colletière (lac de Paladru, près de Grenoble), permet de reconstituer les variations hydrologiques et climatiques de 1000 avant J.C. à 1000 après J.C. sur le piémont des Préalpes occidentales françaises. Les fluctuations bathymétriques peuvent être identifiées avec un haut niveau de résolution chronologique. Sont notés trois importants mouvements régressifs, de 890-895 à 1040 ap. J.C. (entrecoupé d'un court épisode transgressif), de 500/400 à 750-700. ap. J.C., aux IX^e-X^e siècles av. J.C., et une longue période à niveaux globalement hauts du lac, du V^e-VI^e siècles av. J.C. au IV^e-V^e siècles ap. J.C. L'influence anthropique se manifeste faiblement au Bronze Final puis disparaît totalement durant les deux Ages du Fer et la période gallo-romaine. Les témoignages d'activités humaines sur le bassin-versant du lac s'amplifient entre les V^e et VIII^e siècles de notre ère, puis culminent vers l'An Mil. La confrontation des données recueillies entre Rhône et Alpes dans les milieux lacustres, fluviaux et terrestres, conduit à mieux apprécier les effets du climat sur chacun d'eux. L'amélioration climatique centrée sur 500 ap. J.C. (l'optimum de l'Antiquité tardive), et celle de l'an Mil après J.C. (l'optimum médiéval) sont plus particulièrement examinées. Celle qui couvre la fin du haut Moyen Âge, de 890 à 1040 a. J.C., se révèle plus prononcée dans ses conséquences sur les milieux continentaux, cela étant aussi le résultat des conditions climatiques qui l'ont précédé, un résultat d'effets successifs. Le rythme et l'ordre des événements sont aussi importants que le caractère propre de chacun.

Mots-clés : Holocène, sédiments lacustres, microlaminations, fluctuations lacustres, diatomées, changements climatiques, optimum climatique médiéval, Alpes françaises.

ABSTRACT

PALEOENVIRONMENTAL VARIATIONS FROM 1000 BC TO 1000 AD AND LATE ANTIQUITY AND MEDIEVAL CLIMATIC OPTIMA ON NORTHWESTERN ALPS PIEDMONT AT COLLETIÈRE, PALADRU LAKE, FRANCE

A multiproxy study (sedimentology, image computer analysis, algology and palynology) led on a microlaminated lacustrine chalk cored from the medieval archaeological site of Colletière immersed on Paladru lake shore (near Grenoble) provides a palaeohydrological and palaeoclimatic reconstruction from 1000 BC to 1000 AD. Lake level fluctuations are recorded with a very high time resolution. Three important regressive levels are registered from 890-895 to 1040 AD (interrupted by a short transgressive episode), from 500/400 to 750-700 AD, in the IXth-Xth centuries BC, and a long period with high lake levels, V-VIth centuries BC to IV-Vth centuries AD. Anthropogenic signals are very weak during late Bronze age period and quite non-existent during Iron age and roman period. Evidences of human activity on slopes increase between the Vth and VIIIth century AD, and are the highest around 1000 AD. Comparisons with data from regional lacustrine, fluvial and terrestrial environments allow a better understanding of climatic effects. The late Antiquity climatic optimum around 500 AD and the medieval climatic optimum are more specifically examined. The last one, from 890 to 1040 AD appears to be the most well-marked concerning its consequences on continental environments, but depending also on the pre-existing climatic conditions and on their succession. Rhythm and order of events is as important as their peculiar characteristics.

Key-words : Holocene, lacustrine sediments, lake-level variations, diatoms, climate changes, medieval climatic optimum, northwestern Alps.

1 - INTRODUCTION

Plusieurs habitats littoraux immergés ont été identifiés sur les rives du lac de Paladru. Le plus ancien date du Néolithique final (2700-2600 av. J.C.), les trois autres du XI^e siècle après J.C. Celui de Colletière,

occupé de 1006 à la fin des années 1030, fait l'objet de fouilles archéologiques couplées avec un programme pluridisciplinaire d'études paléoenvironnementales (Colardelle & Verdel, 1993, 2000). Les questions posées à partir de ce site exceptionnel concernent le contexte climatique de « l'optimum médiéval » au

¹ Centre d'Archéologie Préhistorique de Valence, UMR 5138 du CNRS. E-mail : cap.valence@wanadoo.fr

² Université Joseph Fourier, Biologie Alpine, Grenoble. E-mail : borejl@wanadoo.fr

³ INRA station d'Hydrobiologie, Thonon. E-mail : druart@thonon.inra.fr

cours duquel se produisent d'importantes transformations de la société. Elles ont également trait au rapport qui semble exister entre la constitution des terroirs par les populations établies sur le bassin versant du lac à différentes époques et le contexte climatique général.

De nombreux carottages ont permis d'étudier l'enregistrement sédimentaire lacustre (Borel *et al.*, 1985 ; Brochier & Druart, 1993). Les dépôts crayeux, antérieurs à l'an Mil ont fourni un enregistrement à haute résolution chronologique. Une première étude a permis d'aborder la question des microlaminations médiévales (Borel *et al.*, 1994). La séquence sédimentaire de 150 cm, plus complète présentée ici, permet de

reconstituer l'évolution paléolimnologique et paléo-environnementale de ce lac du piémont des Préalpes occidentales françaises, de 1000 avant J.C. à 1000 après J.C., juste avant l'occupation médiévale du site.

2 - CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

Le lac de Paladru est situé à 492 m d'altitude, dans les hautes collines qui bordent le flanc occidental du massif préalpin de Chartreuse dont les sommets les plus proches, une vingtaine de kilomètres à l'est, ne dépassent pas 2000 m (fig. 1). Ce lac occupe le fond

Fig. 1 : Situation géographique du lac de Paladru et des autres lacs mentionnés dans le texte et lieux de reconnaissance du sol fossile médiéval (VII^e au XII^e siècle) d'après Berger & Brochier, 2006.

Fig. 1: Geographical position of Paladru lake and others lakes mentionned in the text and situation of discoveries of the medieval fossil soil (VIIth to XIIth century), after Berger & Brochier, 2006.

d'une ancienne vallée glaciaire, dans une dépression creusée dans la molasse miocène gréseuse et barrée par des moraines pléistocènes argilo-graveleuses. D'une superficie de 391 ha et d'une profondeur maximale de 33 m, son volume d'eau est de 97 millions de m³. Avec un total annuel de 1168 mm de pluie et une moyenne thermique annuelle de 9,7°C, le climat est humide et frais. Le nombre de jours de précipitation est élevé, avec une distribution très irrégulière au cours de l'année.

Les études hydrologiques montrent que le plan d'eau du lac enregistre parfaitement le régime pluviométrique (Feyt, 1982). Il n'y a quasiment pas de tributaires et l'unique exutoire est très étroit. Avant les travaux de régulation hydrologique en 1869, les débits de sortie du lac pouvaient varier entre 100 l/s et 10 000 l/s. Pour une moyenne de précipitation de 1000 mm, l'amplitude des variations bathymétriques ne dépassait alors pas 0,70 m au-dessus de l'étiage (*ibid*). Cette valeur est en bon

accord avec celle qui est indiquée pour le XIX^e siècle, soit des variations de 1, 22 m au maximum.

3 - POSITION SÉDIMENTAIRE DES CAROTTAGES ÉTUDIÉS

Sur la rive sud-est du lac, le gisement médiéval de Colletière a fait l'objet de plusieurs campagnes de carottages (fig. 2). Il est actuellement recouvert par 1 à 5 m d'eau, selon le niveau du lac. L'habitat s'est installé sur la beine de craies lacustres déposées en système de fuseaux progradant depuis la rive (fig. 2c). Quatre longs transects stratigraphiques ont été décrits (Brochier & Druart, 1993). Les dépôts lacustres présentent une stratification très rythmée, succession rapide de laminations plurimillimétriques à millimétriques, interrompues au sommet par l'exondation et l'occupation humaine. L'avancée de la beine lacustre carbonatée

Fig. 2 : Carte simplifiée de l'aire étudiée montrant le site médiéval de Colletière sur la rive du lac de Paladru (2a), la position des carottages C1+C2 (2b) et le contexte stratigraphique de la rive (2c).

Fig. 2: Simplified sketch map of the study area showing Colletière medieval site (2a); situation (2b) and stratigraphic (2c) position of cores C1, C2.

constitue alors une sorte de presque île. Les sédiments lacustres postérieurs aux couches archéologiques sont détruits ou remaniés et se déposent ou redéposent à l'avant du talus (fig. 2c). Ils sont moins carbonatés, plus détritiques et moins finement stratifiés. L'occupation du site et du bassin versant à l'an Mil marque une rupture dans le régime des sédimentations du lac de Paladru (*ibid*).

Deux carottes C1 et C2, distantes de 1 mètre, ont été prélevées dans le secteur d'enregistrement sédimentaire à plus haut degré de résolution temporelle pour la période correspondant à la fin du haut Moyen Âge (fig. 2c). Elles ont permis d'étudier 150 cm de séquence, dont les 80 cm supérieurs ont une vitesse de sédimentation plus rapide, donc une meilleure qualité d'enregistrement. Réalisées immédiatement sous la couche archéologique, le haut de la séquence lacustre est donc calée précisément en chronologie par le début de l'occupation médiévale (1006 AD).

4 - MÉTHODES ET MATÉRIAUX

L'étude des microrhythmes sédimentaires dans les séquences lacustres a déjà été abordée sur plusieurs lacs (Saarnisto, 1979 ; Lotter, 1991 ; Freytet & Verecchia, 2002). Un travail méthodologique a été réalisé ici sur les microlaminations médiévales (Borel *et al.*, 1994). Il a montré qu'elles résultaient de la combinaison de quatre facteurs : un facteur climatique global qui donne une pulsation de fond (échelle décennale et pluridécennale) ; un facteur météorologique local, exceptionnel, qui est à l'origine des microrhythmes de 1 à 5 mm (échelle de l'année ou de la saison) ; un facteur climato-météorologique, à l'échelle bi ou pluri-annuelle donnant un microlitage de 0,2 à 0,3 mm (saisons) ; un facteur lié au flux détritique terrigène, probablement d'origine anthropique, dépendant du recouvrement par la végétation forestière du bassin versant et de l'intensité des pluies (rythme des occupations humaines et du climat). Dans l'ensemble, les sédiments sont de texture silteuse (fines : 82 à 92 %), parfois plus granuleuse (sables composés de concrétions carbonatées : 25 à 30 %). Il s'agit de craies présentant des taux de carbonates qui évoluent entre 90 et 98 %.

Les laminations étant millimétriques à submillimétriques, le choix a été fait d'analyses non destructives. Nous avons opté pour une stratégie associant : analyse d'image à l'ordinateur, étude du sédiment en lames minces, algologie et palynologie. Les carottages ont été effectués dans des tubes PVC de 9 cm de diamètre. Une première étude sur la carotte C1 a concerné les 80 cm supérieurs avec un pas d'échantillonnage très serré, et une lame mince continue. Les 70 cm inférieurs ont été étudiés sur C2 dans un deuxième temps, avec un pas d'échantillonnage un peu plus large du fait de microstratifications moins développées. Une moitié des carottes a servi à l'étude des sédiments en analyses non destructives, l'autre moitié a été échantillonnée par

microcouche pour les préparations algologique et palynologique. Afin d'éviter les mélanges, c'est l'unité sédimentaire qui a primé sur un pas d'échantillonnage arbitraire.

4.1 - ANALYSE DES SÉDIMENTS

La technique repose sur l'analyse d'image à l'ordinateur couplée avec l'observation au microscope effectuée sur des lames minces. Les paramètres lithostratigraphiques individualisant une unité sédimentaire présentent une grande variabilité. Ils jouent principalement sur une gamme de couleurs (plus ou moins beige/ blanc/ vert/ brun) et d'intensités (plus ou moins clair/sombre), plus rarement sur des caractères texturaux (plus ou moins fin/granuleux). Cette forte variabilité ne permet pas d'établir à l'œil nu un classement hiérarchisé des microniveaux. Pour l'obtenir, une méthode de traitement par analyse d'image à l'ordinateur a été mise au point (Brochier & Estienne, 1988). La surface d'une demi-carotte est numérisée par tronçons de 10 cm de long. Les conditions d'éclairage et d'humidité sont maintenues constantes. Une analyse en fausses couleurs, sur 360 niveaux colorés, est exécutée à l'ordinateur. Un histogramme de distribution des couleurs selon le nombre de pixels est produit pour chaque niveau coloré, tous les 5mm. Nous avons retenu ici, parmi les plus représentatifs : le bleu clair, le bleu moyen, le vert et le brun (fig. 3). Les réponses colorées dépendent principalement de la nature des différents constituants du sédiment et de leurs assemblages, précisés au microscope. La combinaison d'un trop grand nombre de facteurs à l'origine de ces microlaminations exclut une simple analyse spectrale sur les niveaux de gris. L'image globale en fausses couleurs, présentée plus loin (fig. 9), est une vue synthétique où se distinguent micro et macro rythmes ; le classement et l'interprétation des microstrates se basent sur les histogrammes.

Les lames minces de sédiment sont réalisées à partir de la même moitié de carotte, indurée de résines polymères après échange eau/acétone. Elles sont destinées à l'observation au microscope pétrographique en lumière naturelle ou polarisée (Merkt, 1971). Les 80 cm supérieurs de la séquence ont donné lieu à des lames en continu ; sur les 70 cm inférieurs, il n'y a jamais plus de 5 cm entre chaque segment. Les comptages sont effectués sur chaque lamine repérée au microscope ; dans les unités sédimentaires plus épaisses, un comptage est réalisé tous les 5 mm. Les variations de onze paramètres ont fait l'objet d'une estimation semi-quantitative (fig. 4). Ils concernent d'une part les cristallisations carbonatées, plus sparitiques ou plus micritiques (fig. 5a, 5b), les carbonates biogéniques, tubes (fig. 5c), et oogones de characées et d'autre part le détritisme terrigène minéral et organique colloïdal, microcharbons, et débris végétaux micro et macrophytes (fig. 5b et 5d). La charge détritique organo-minérale fine est appréciée d'après l'aspect et la couleur du plasma qui devient plus gris brun.

Fig. 3 : Analyse d'image en fausse couleur, comptage des pixels colorés des niveaux : bleu clair, bleu moyen, vert et brun ; carottes Colletière C1+C2 ; les grisés servent de repères.

Fig. 3: Digital color analysis, pixels: light blue, medium blue, green, brown; cores Colletiere C1+C2; grey tints serve as guide mark.

La combinaison de l'analyse d'image avec l'étude des divers faciès sédimentaires identifiés en lames minces permet d'interpréter les réponses colorées de l'analyse en fausses couleurs. Les courbes des bleus montrent les tendances de la carbonatation (fig. 3 et 5). Les variations du bleu moyen sont liées aux cristallisations plus sparitiques ou plus micritiques des carbonates. Les courbes du vert et du brun (fig. 3) sont liées à des faciès présentant un flux détritique organo-minéral (fig. 5b et 5d). La corrélation entre détritisme, micro-charbons, débris végétaux et augmentation du nombre de grains de pollen corrodés démontre leur origine commune, à savoir les apports alluvio-colluvionnaires occasionnés par l'érosion des versants. Les maxima de sparite (17-18, 22, 24 et 30 cm, fig. 4) correspondent à des minima de la courbe du détritisme et du brun (fig. 3). Ces dépôts traduiraient des épisodes chauds et secs de courte durée (une saison) qui favoriseraient les cristallisations sparitiques de carbonates, et des niveaux lacustres plus bas. La corrélation avec les diatomées de bas niveau est bonne. Tubes et oogones de characées sont nombreux autour de 130, 100 et 90 cm,

ils indiquent des niveaux plus bas du lac (fig. 4). Lorsque les tubes atteignent des maxima mais pas les oogones (de 0 à 60 cm), nous rattachons ces pics à un tri en milieu littoral, clairement observé en lame mince. Ces tubes, redéposés, sont plus l'expression d'une dynamique littorale que celui de l'extension d'une prairie de characées. L'interprétation des oogones reste toujours plus aléatoire en termes de niveaux du lac.

Le phasage de la séquence sédimentaire proposé au chapitre suivant s'appuie sur l'ensemble de ces données et celles des diatomées qui confirment les propositions de variations de niveaux du lac.

4.2 - ANALYSE DIATOMIQUE

L'étude des diatomées permet d'appréhender, entre autres, l'évolution de la bathymétrie du lac. Des études ont déjà été entreprises sur d'autres lacs alpins : Nantua (Feuillade *et al.*, 1994), Annecy (Druart & Pelletier, 1998), Léman (Moscardiello *et al.*, 2000).

Fig. 4 : Analyse au microscope de différents paramètres sédimentaires ; carottes Colletière C1+C2 ; en classes d'abondance de 0 à 10 ; les grisés servent de repères.

Fig. 4: Microscopic analysis, sedimentaries parameters, cores C1+C2; abundance groups 0 to 10; grey tints serve as guide mark.

Les diatomées de hauts niveaux lacustres sont représentées par des algues se développant plus particulièrement au dessous de 2 m de profondeur (*Cyclotella costei*, *C. radiosa*, *Fragilaria pinnata*, *F. leptostauron*, *Denticula tenuis*), tandis qu'*Achnanthes lanceolata*, *Cymbella caespitosa*, *Amphora minuta*, *Cocconeis pediculus*, *Navicula cryptocephala* sont des algues se développant dans une tranche d'eau de faible épaisseur, allant de la surface à 2 m de profondeur (fig. 6 et 7). Il existe une marge d'erreur dans l'interprétation de cette bathymétrie, dans le sens où d'autres paramètres écologiques (eutrophisation, climat, pH, etc..) peuvent interférer dans cette analyse.

4.3 - ANALYSE POLLINIQUE

Les échantillons de craie lacustre ont été préparés classiquement, et les dénombrements ont été effectués sur des fractions volumétriques identiques. L'analyse botanique exhaustive de la couverture végétale n'est pas présentée ici ; sont seulement utilisés (fig. 8) le

rapport AP/NAP, la courbe des spores d'*Equisetum* liés aux facteurs bathymétriques, la courbe des pollens corrodés liés au détritisme et à la bathymétrie, et la courbe des pollens de *Castanea* comme donnée sur l'histoire de cet arbre et l'anthropisation

Les épisodes de baisse du niveau moyen du lac sont généralement soulignés par des augmentations parallèles de pourcentages de pollens arboréens occasionnées par de vigoureuses multiplications de pollens d'aulne, *Alnus glutinosa* très probablement. Tout se passe comme si l'aulnaie riveraine colonisait promptement la partie supérieure du rivage récemment exondé. Mais l'élément caractéristique réside dans les maxima contemporains de spores de prêles, même si ces pics sont nettement moins marqués dans la partie basale de la carotte. On observe une bonne corrélation entre ces maxima et ceux des diatomées de bas niveau lacustre (fig.7 et 8). Eu égard à l'indétermination au niveau spécifique, il est impossible de préciser si les dites prêles participent au peuplement dense d'héliophytes du type roselière ou à l'aulnaie riveraine. On notera toutefois

Fig. 5 : Faciès microsédimentaires. 5a : lamine à cristaux micritiques (haut) et lamine à cristaux micritiques (bas) (lumière polarisée, barre = 1 mm) ; 5b : lamine à cristaux sparitiques (1/3 haut) et lamine à cristaux micritiques avec matériel fin organique et minéral d'origine détritique (2/3 bas) (lumière naturelle, barre = 1 mm) ; 5c : tubes de Characées et carbonates sparitiques (lumière naturelle, barre = 1 mm) ; 5d : faciès carbonaté micritique avec charge détritique organique et minérale fine, microcharbons et débris organiques plus grossiers (lumière naturelle, barre = 1 mm).

Fig. 5: Microsedimentaries faciès. 5a: micritic lamina (high) and sparitic lamina (low) (crossed nicols, bar = 1 mm; 5b: sparitic lamina (1/3 high) and micritic lamina with organic and mineral detrital matter (2/3 low) (plane polarised light, bar = 1 mm); 5c: Chara and sparitic calcium carbonate facies (plane polarised light, bar = 1 mm); 5d: micritic calcium carbonate facies with fine detrital organic mineral matter, organic debris and charred particles (plane polarised light, bar = 1 mm).

que diverses espèces caractéristiques des aulnaies à grandes herbes ont été reconnues, telles que la reine des prés, *Filipendula ulmaria*, et le liseron, *Calystegia sepium*.

Une identification et un dénombrement poussé des espèces hydrophytes ont été réalisés. Les pollens de plantes aquatiques, toujours assez rares, ne présentent jamais de regroupement significatif témoignant d'épisodes transgressifs ou régressifs. Leur distribution demeure hétérogène.

Les pollens corrodés sont liés aux flux détritiques (fig. 3, 4 et 8) et proviennent vraisemblablement de litières végétales altérées et érodées.

4.4 - CADRE CHRONOLOGIQUE

Le haut de la séquence sédimentaire est calé par la couche archéologique (juste au dessus du 0 cm des carottages, fig. 3 à 9) qui se met en place dès la construction de l'habitat, entre 1006 et 1009 ap. J.C., selon la dendrochronologie. De façon cohérente, la dendrochronologie et divers éléments attestent une occupation qui, commencée dans la première décennie du XI^e siècle, prend fin en 1040 (Alexandre *et al.*, 1993 ; Colardelle

& Verdel, 2000). Six dates radiocarbone, réparties sur les 150 cm de séquence, présentent une bonne cohérence et constituent les indispensables repères chronologiques. La séquence sédimentaire étudiée s'édifie de 1000 avant à 1000 après J.C. Les dates obtenues, sur débris organiques sont présentées tableau 1.

Cette séquence de dates montre que la vitesse de sédimentation, lente à la base, s'accélère entre 100 et 80 cm (fig. 9). Ces fortes variations du taux de sédimentation rendent difficile l'exploitation d'un modèle âge profondeur. Nous proposons d'utiliser les microlaminations particulièrement bien enregistrées dans les 30 derniers centimètres du haut de la séquence. Elles ne suivent pas un rythme régulier qui permettrait un décompte du temps, mais plusieurs rythmes superposés dépendant de processus sédimentaires de durées et de puissances de dépôt très différentes qui répondent à des événements survenus dans le bassin versant. Les microlits remarquables, parce qu'en rupture au sein de tendances sédimentaires à plus long terme, reflètent donc des épisodes climato-météorologiques exceptionnels qui vont servir de repères pour abaisser le seuil de résolution chronologique. Il s'agit le plus souvent de lamines claires et très carbonatées qui signent des années/saisons plus chaudes et sèches (corrélation avec

profondeur	âge conventionnel	âge calibré 1 sigma	âge calibré 2 sigma	n° laboratoire
28-29 cm	1160+/-55 BP	780-975 cal AD	694-998 cal AD	ETH 6991
75 cm	1250+/-55 BP	687-868 cal AD	661-938 cal AD	ETH 6992
90 cm	1495+/-55 BP	535-638 cal AD	428-658 cal AD	ETH 14057
103 cm	1625+/-55 BP	387-531 cal AD	260-559 cal AD	ETH 18266
139 cm	2505+/-65 BP	792-414 cal BC	803-403 cal BC	ETH 18267
145 cm	2715+/-60 BP	916-808 cal BC	999-796 cal BC	ETH 14058

Tab. 1 : Liste des dates radiocarbone obtenues sur débris organiques, carottes Colletière C1+C2, calibration radiocarbone d'après Stuiver *et al.*, 2000.

Tab. 1: List of radiocarbon dates, on organic material, cores Colletière C1+C2, radiocarbon calibration from Stuiver et al., 2000.

les diatomées, dynamique de tri de bas niveau, calcite sparitique favorisée). Ces accidents sédimentaires sont mis en relation avec des événements climatiques remarquables signalés par les annales monastiques et repérés dans les séquences dendrologiques (Alexandre *et al.*, 1993) ou les analyses isotopiques sur les cernes de bois (Fehri, 1993).

Fondée sur le rapprochement entre les témoignages écrits et les données paléoécologiques, cette grille de lecture du temps, précise à l'année près pour les événements exceptionnels, ne constitue effectivement qu'une hypothèse de travail. On constatera que le décompte de ces événements, à partir du terminus de 1006 ap. J.C. aboutit à la date de 895 ap. J.C. à 29 cm, en accord avec la date ^{14}C obtenue pour ce même niveau. La séquence de 8 à 15 cm, que nous datons ainsi de 946 à 974 ap. J.C., est aussi peu marquée en événements sédimentaires qu'en épisodes singuliers mentionnés par les sources écrites. En dessous des 30 premiers centimètres, la grille temporelle devient moins précise en descendant et les textes sont également plus rares. Mais pour le X^e siècle ap. J.C., l'excellente cohérence de l'ensemble des données datées (radiocarbone, dendrologie, analyses isotopiques) assure la validité du cadre décennal. On constatera qu'un modèle âge-profondeur, bâti sur la date radiocarbone obtenue à 29 cm et les données dendrochronologiques datant la première occupation médiévale, donne des taux de sédimentations variant autour de 2 mm/an qui restent cohérents avec les dates proposées. La

proposition faite a l'intérêt de montrer qu'il a pu y avoir des variations du taux de sédimentation de 2,3 à 3,6 mm par an (cf. fig. 9), ce qui nous paraît être plus en accord avec la réalité des dynamiques sédimentaires.

5 - RÉSULTATS SUR LES PHASES SÉDIMENTAIRES, ALGOLOGIQUES ET LES VARIATIONS DU MILIEU LIMNIQUE

L'analyse multiproxies (fig. 3 à 8) conduit à distinguer 9 grandes phases sédimentaires. Les corrélations de différents paramètres permettent d'interpréter ces phases en épisodes de plus ou moins hauts ou bas niveaux du lac et d'en dresser la courbe de variation (fig. 9). Des dates sont proposées pour des années exceptionnelles selon la méthode relatée ci-dessus.

Phase A, de 0 à 8 cm, de 1040 à ca. 974 ap. J.C., haut Moyen Âge

La prolifération des tubes de *Chara* en l'absence d'oogones, la bonne représentation des sparites sont des indices de bas niveaux, confirmés par la plus grande abondance d'espèces littorales de diatomées (*Cymbella* spp., *Achnanthes* spp.) et par une diminution concomitante de *Cyclotella costei*. On assiste simultanément, dans les pollens, à une meilleure représentation d'*Equisetum* qui indique un rapprochement de la rive lacustre. La charge détritique est forte, notamment en microcharbons. Après un épisode A1,

Fig. 6 : Diatomées de hauts niveaux lacustres (1) et de bas niveaux lacustres (2).

Fig. 6: Diatoms from high lake levels (1) and low lake levels (2).

942-44, à précipitations particulièrement abondantes relatées dans les textes.

Phase C, de 18 cm à 29-31 cm, de ca. 942 à ca. 895-890 ap. J.C., haut Moyen Âge

Date AMS à 28-29 cm = cal. AD 1 sigma : 780-975, 2 sigma : 694-998.

Cette phase est clairement identifiée par une charge détritique forte. Les tubes de *Chara* sont épisodiquement nombreux. Plusieurs paramètres montrent de fortes variations, reflets d'une certaine instabilité et d'une succession d'années exceptionnelles (à 18, 22, 24, 28,5-30 cm, corrélées aux années sèches relatées dans les textes : 946, 928, 921, 895 AD). Cette phase régressive et ces épisodes sont reconnus dans les diatomées par une progression des espèces littorales dont *Cymbella* spp., et dans les pollens par une élévation des pourcentages d'*Equisetum*. Des moments de forts stress hydriques, et une ambiance globalement déficitaire en eau, induisent un abaissement généralisé du lac. Des niveaux du lac aussi bas qu'au cours de la phase A ont été atteints, c'est-à-dire 3 à 4 m sous le niveau actuel. La réduction de la lame d'eau concentrerait la charge détritique. La coupure sédimentaire avec la phase D est nette.

Phase D, de 29-31 cm à 55 cm, de ca. 890-895 à ca. 800 ap. J.C., haut Moyen Âge

Elle présente une plus grande stabilité de la sédimentation, ainsi que de très faibles taux de détritisme terrigène, un peu plus élevés de 40 à 47 cm. Cette phase D2, marquée par une instabilité un peu plus grande et des concentrations de tubes de *Chara*, pourrait représenter une succession de plus bas niveaux lacustres, le niveau restant globalement haut. Les populations de diatomées progressent fortement en dessous de 34 cm, traduisant des phases plus transgressives. Les niveaux du lac, les plus hauts, voisins du 0 actuel, seraient atteints à la fin de la phase D3, où les diatomées de hauts niveaux progressent également.

Phase E, de 55 cm à 72-74 cm, de ca. 800 à 750/700 ap. J.C., haut Moyen Âge

D'abord plus micritique de 55 à 63 cm, la sédimentation carbonatée ainsi que les diatomées révéleraient un niveau d'eau, sinon plus élevé, au moins autant qu'en D ; les tubes de *Chara* dans la partie supérieure sont cependant aussi nombreux qu'en D2. Plus spatitique en dessous de 63 cm, la tendance serait à l'abaissement. La charge détritique organo-minérale est bien présente, sous la forme de lits d'épaisseur inférieure à 0,5 mm, impossibles à décompter, qui pourraient être saisonniers. Quelques pics de microcharbons et de débris végétaux signalent des feux et une érosion sur les versants. Le grand nombre de diatomées corrobore l'élévation de la lame d'eau. La sédimentation carbonatée est rapide ; on peut l'estimer au cours des phases E et D à 3mm/an.

Fig. 7 : Variations des diatomées de hauts et bas niveaux lacustres sur les carottes C1+C2.

Fig. 7: Diatoms from low (left) and high (right) lake levels on cores C1+C2.

fortement régressif, marqué par plusieurs moments de forts stress hydriques (années sèches 974, 981 et 994 ap. J.C., à 4, 5,5 et 7 cm) l'atterrissement de la rive est atteint au cours de la phase A2 (grains détritiques millimétriques provenant du littoral). Le littoral est exondé pendant la phase A3 qui voit le dépôt de couches organiques de l'habitat médiéval de Colletière, de 1006 à ca. 1040 ap. J.C. Le niveau du lac serait alors 3 à 4,7 m sous le niveau actuel (Brochier & Druart, 1993).

Phase B, de 8 cm à 18 cm, de ca. 974 à ca. 942 ap. J.C., haut Moyen Âge

Cette phase est marquée par une sédimentation carbonatée (courbe des bleus), non perturbée par un détritisme qui reste faible, dilué dans une lame d'eau plus haute. C'est le taux de sédimentation le plus rapide de cette séquence : 3,57 mm/an. L'accroissement des *Cyclotella* spp, et du nombre de frustules attestent de l'élévation de la hauteur d'eau. Il serait voisin du niveau actuel. L'évènement exceptionnel, sec et chaud, à 15,5 cm peut-il être corrélé à l'année 958 AD de plus forte croissance des cernes du chêne (Alexandre *et al.*, 1993) ? Cette phase pourrait commencer avec les années

Fig. 8 : Analyse des pollens et spores sur les carottes C1+C2.

Fig. 8: Pollen and spore analysis on cores C1+C2.

Phases F de 72 cm à 104 cm, de ca. 750/700 ap. J.C. à ca. 500/400 ap. J.C., Fin de l'Antiquité et haut Moyen Âge
Dates AMS à 75 cm = cal. AD 1 sigma : 687-868, 2 sigma : 661-938 ; à 90 cm = cal. AD 1 sigma : 535-638, 2 sigma : 428-658.

Les formations carbonatées restent tout autant sparitiques que dans le bas de la phase E, mais la vitesse de sédimentation comme l'expriment clairement les dates radiocarbone chute à 0,8-1 mm/an. La phase F1 est marquée par la courbe des bleus moyens et une grande quantité de restes de *Chara*. Le détritisme terrigène, surtout composé de débris végétaux, y est plutôt élevé comme en F3. Il paraît plus faible en F2 d'après la courbe du marron, mais l'élévation de la courbe du vert semble indiquer qu'il existe une autre forme de détritisme. Les diatomées sont peu nombreuses de 77,5 à 80,5 cm, et marquent un maximum d'espèces de bas niveaux (F3). Jusqu'à 83,5 cm (F2), la présence assez importante de diatomées pélagiques (*Cyclotella* spp) montre que la tranche d'eau ne s'abaisse pas suffisamment pour que ces niveaux rentrent dans le domaine littoral ; les prêles disparaissent également. La tendance est à la régression pour toute la phase F ; des niveaux

assez bas ont du être atteints, F2 marquant un court moment d'élévation de la lame d'eau.

Phase G, de 101 à 136 cm, de ca. 500/400 ap. J.C. à ca. 600/500 av. J.C., Période romaine et la Tène
Date AMS à 103 cm = cal. AD 1 sigma : 387-531, 2 sigma : 260-559.

La courbe des bleus moyens montre une sédimentation carbonatée active qui n'est pratiquement plus altérée par des arrivées détritiques (courbe des verts proche de zéro, pas de charbons). La vitesse de sédimentation tombe en dessous de 0,5 mm/an. L'enregistrement est moins précis et les paramètres sédimentaires deviennent difficiles à interpréter. Cette phase peut se diviser en deux parties. G2 (101/104 à 116/118 cm) est caractérisée par une charge détritique minérale et organique qui détermine des pics de marron et une grande instabilité des bleus. G1 (116/118 à 136 cm) apparaît moins détritique avec un développement des characées et une carbonatation induisant une réaction de la courbe des bleus clairs insensibles jusqu'alors. A 129 cm, le pic des bleus associé à de nombreux débris de *Chara* peut être attribué à un

abaissement momentané de la lame d'eau qui n'est pas ressenti par les diatomées. La sédimentation diatomique est également très irrégulière entre 101 et 117 cm (G2). Globalement, les diatomées de haut niveau sont très abondantes.

Phase H, de 136 cm à 141,5 cm, entre ca. 600/500 av. J.C. et 800/700 av. J.C., Hallstatt

Date AMS à 139 cm = cal. BC 1 sigma : 792-414, 2 sigma : 803-403.

Le pic du développement des cristaux de sparite, la baisse dans la courbe du bleu clair et les pics de la courbe du brun, liés au développement du détritisme organo-minéral et des débris végétaux, montrent que l'on est dans un autre régime sédimentaire qu'en G. Le pic de diatomées littorales à 138 cm, confirme ce qui semble bien être un moment de bas niveau du lac. Le détritisme terrigène dénote une certaine ouverture des versants, mais les charbons sont toujours absents.

Phase I, de 141,5 cm à 152 cm, de ca. 800/700 av. J.C. à ca. 1000/900 av. J.C., Âge du Bronze final IIIb

Date AMS à 145 cm = cal. BC 1 sigma : 916-808, 2 sigma : 999-796.

Les caractères sont voisins de ceux de la phase H, mais plus irréguliers. Par opposition à la phase G, et compte tenu de la profondeur de cette partie de la séquence, nous les interpréterons comme les signes d'une tendance régressive du lac. Les diatomées ont quasiment disparu pour une raison inexplicée.

6 - RÉSULTATS SUR LES TRANSFORMATIONS DU BASSIN VERSANT PAR L'HOMME

Les signes d'anthropisation du bassin versant reposent sur les flux détritiques terrigènes issus du lessivage de sols, accompagnés de microcharbons (fig. 9) et d'indicateurs polliniques. Ils restent très faibles du X^e siècle au V^e siècle av. J.C. (phases I et H), mais représentent cependant l'existence d'ouvertures d'origine humaine du paysage. Les pollens de rudérales et de céréales de la phase I, à la fin de l'Âge du Bronze, en attestent. Aucun site de ces périodes n'est connu autour du lac, seulement quelques vestiges très dispersés, mais l'occupation des Alpes et de ses marges est clairement attestée à cette époque (Bocquet, 1997).

Des VI^e-V^e siècles av. J.C. aux IV^e -VI^e siècles ap. J.C. (phase G), les traces d'occupation du versant sont toujours très faibles, un peu plus fortes en G2. Aucune trace de culture n'est reconnue dans les pollens, si ce n'est les premiers pollens de *Castanea*. Des sites romains existent pourtant sur le pourtour du lac. Les façons de gérer le territoire à ces périodes ne génèrent pas d'érosion. Aucun charbon n'indique la pratique de brûlis. Dans la même région, au Grand-Lemps, en Dauphiné, des déboisements intenses sont signalés à la période gallo-romaine, avec sans doute drainage des zones marécageuses (Clerc *et al.*, 1989). À Pluvis,

l'exploitation à l'époque romaine s'accompagne d'importants travaux d'aménagement (Borel *et al.*, 1990).

Les V^e à VIII^e siècles marquent sans conteste un moment fort d'exploitation des versants du lac de Paladru (phase F). Les apports détritiques augmentent, au dessus de 104 cm, avec l'arrivée des premiers charbons, confortant l'origine anthropique de ce détritisme. La pratique de l'essartage est fréquente, exprimée par la quantité de microcharbons sédimentés dans le lac. Leur absence pendant les siècles précédents, et leur intervention sur une forêt décidue exclut une origine naturelle de ces feux, même s'ils ont pu être favorisés par la plus grande sécheresse de la phase F (régression). En l'absence de véritables sites archéologiques, ces traces signent une réelle exploitation des terres qui n'était pas soupçonnée dans les débuts du haut Moyen Âge. Dans les Basses Terres du Rhône des indices d'anthropisation sont signalés aux mêmes périodes (Salvador *et al.*, 2005), ainsi que dans les Préalpes du Diois (Brochier, inédit) et en moyenne vallée du Rhône (Berger & Brochier, 2006)

Au X^e siècle ap. J.C., les phases C et A sont celles qui portent le plus de traces d'anthropisation. Un siècle avant l'installation des grands sites d'habitat palafittiques sur les rives du lac, ses versants sont exploités. Le retour aux textes a permis d'en retrouver des preuves dans les archives (Verdel, com. pers.). Les flux détritiques dans le lac du Bourget, reflets du bassin versant du haut-Rhône, montrent une élévation entre 500 et 650 ap. J.C., puis une baisse, et enfin une augmentation continue à partir de 890 ap. J.C. (Arnaud *et al.*, 2005).

L'an Mil et l'occupation des sites littoraux marquent une profonde coupure dans les équilibres limnologiques antérieurs. Tous les carottages du site de Colletière, mais aussi ceux des Grands Roseaux et celui fait au milieu du lac à -30 m, présentent à cette période un passage brutal à des sédimentations moins carbonatées, plus détritiques, moins régulièrement microstratifiées (Brochier & Druart, 1993). On peut penser que les changements démographiques, sociaux, et les modes d'exploitation des terres qui en découlent, ont profondément modifié l'écosystème lacustre, sans négliger l'effet du rafraîchissement sensible de 1100 à 1200 ap. J.C. (Holzhauser *et al.*, 2005) qui pourrait également réduire la puissance de la carbonatation. Le rôle des déboisements et de la chute consécutive de l'évapotranspiration sur le bilan hydrique est un des paramètres à prendre en compte dans la remontée des eaux du lac au milieu du XI^e siècle ap. J.C. Une rupture sédimentaire et un accroissement des flux détritiques a également été observé à l'an Mil au petit lac d'Annecy (Higgit *et al.*, 1991 ; Buillit *et al.*, 1997 ; Noël *et al.*, 2001).

On observera que toutes les phases à forts indices d'anthropisation sont des phases de bas niveaux du lac. Il existe un lien entre une lame d'eau peu élevée et des concentrations en apports détritiques dans les sédiments. Les pollens de la forêt riveraine sont également mieux représentés. Cet effet de la bathymétrie a déjà

Fig. 9 : Analyse numérique en fausses couleurs des carottes C1+C2 (cf. fig. 3), numérisation P. Estienne, et évolution paléolimnologique et hydrologique du lac de Paladru de 1000 avant à 1000 après J.C.

Fig. 9: Digital analysis on cores C1+C2 (cf. fig. 3) P. Estienne and paleolimnological and hydrological evolution from 1000 BC to 1000 AD on Paladru lake.

été signalé (Odgaard, 1992). Les phases plus sèches et les pluies concentrées ont également pu favoriser l'utilisation des feux et l'accroissement des surfaces érodées. La vitesse de sédimentation authigène influe aussi sur la représentativité du flux détritique, plus ou moins concentré ou dilué. La variation de la charge détritique anthropogène est donc à manier avec prudence ; elle n'implique pas forcément une relation directe avec l'ampleur de l'anthropisation du bassin versant.

7 - DISCUSSION SUR LES VARIATIONS DU LAC DE PALADRU ET DANS LES MILIEUX CONTINENTAUX VOISINS

7.1 - LES BAS NIVEAUX LACUSTRES DE 1000 À 600/500 AV. J.C. (PHASES I ET H)

La phase I est classiquement reconnue dans les lacs alpins, français et suisses ; la régression aurait commencé avant 1050 et s'achèverait après 850 (Magny, 1993a,b, 2001). Sur le lac de Neuchâtel (Suisse), on peut en situer la fin avant le début de la palynozone subatlantique, soit 750-800 av. J.C. (Brochier, en cours). Sur le littoral du lac de Paladru, plusieurs carottages ont permis de mettre en évidence des bas niveaux lacustres : aux Grands Roseaux, des limons organiques datés de 1406-1069 av. J.C. (3013 ± 147 BP, CRG 1619) sont surmontés d'un niveau tourbeux daté de 1085-834 av. J.C. (2841 ± 110 BP, CRG 1620), et à la Bourgealière un bois flotté daté de 1311-896 av. J.C. (2891 ± 191 BP, CRG 1083) se trouve dans une formation littorale à oncolithes.

La phase H, mal datée, entre 800 et 500 av. J.C., présente des caractères sédimentaires et algologiques de bas niveau. Il est possible que cette phase ne soit qu'un épisode de courte durée, de l'ordre d'une décennie, assez marquant toutefois pour modifier la flore diatomique ; moment régressif qui n'aurait pas été repéré par les analyses habituelles sur d'autres lacs. Du Jura aux Alpes, le niveau des lacs remonte au cours du premier Âge du Fer, après 868 au lac d'Annecy et plus globalement 800 av. J.C. (phase du Bourget, Magny, 1992, 2004). Dans le bassin du Rhône, on observe, de 800 à 400 av. J.C., une phase d'aggradation des lits fluviaux et de tressage fluvial, rapportée, comme la hausse des niveaux lacustres, à un refroidissement du climat et une augmentation des précipitations au Subatlantique (Berger, 2003 ; Bravard, 1997). Dans les petits bassins locaux adjacents au Rhône, l'intensité de l'érosion et des transports solides nécessite la récurrence d'épisodes à pluie concentrée, plus particulièrement de 750-700 à 600-550 av. J.C. (Berger & Brochier, à paraître). La phase H pourrait indiquer que cette nouvelle période globalement plus froide et humide commence par un à deux siècles de climat à saisons contrastées, certaines années à fort déficit hydrique pouvant se succéder et entraîner une baisse des niveaux lacustres. La remontée du niveau des lacs à la fin du IX^e siècle av. J.C. ne serait donc pas globale et uniforme.

7.2 - LES HAUTS NIVEAUX LACUSTRES DE 700/500 AV. J.C. À 500 AP. J.C. (PHASE G)

L'enregistrement sédimentaire lacustre de Colletière montre une certaine homogénéité entre la fin du VI^e siècle av. J.C. et celle du V^e siècle ap. J.C., et un maintien de hauts niveaux lacustres. Les lacs jurassiens et périalpins présentent également au cours de cette période d'importantes phases de hauts niveaux (Bourget et Petit Maclu 1, Magny, 1992, 1993a, 1993b) mais séparées par une phase régressive (fig. 10(2)) qui est ici peu perceptible (fig. 9). Il ne semble pas que le bas niveau du lac de Paladru, marqué à 129 cm, puisse correspondre à cet épisode. Autour du lac, plusieurs niveaux de tourbe sont datés entre le III^e et VI^e siècles ap. J.C. (Brochier & Druart, 1993). D'une précision chronologique insuffisante, ils marquent l'existence de niveaux d'eau peu élevés, jamais beaucoup plus bas qu'1 à 2 m en dessous du niveau actuel, comme le montre également l'occupation romaine de la Bourgealière aux II^e-III^e siècles ap. J.C. Les phases régressives du lac de Paladru au cours de la période romaine sont moins prononcées que celles qui les précèdent (H et I) ou celles qui vont suivre (F, C et A).

Si l'on se réfère aux dynamiques fluviales connues entre Rhône et Alpes à l'époque romaine, le fleuve montre, du II^e siècle av. J.C. aux IV^e-V^e siècles ap. J.C., un régime fluvial régulier sans débits extrêmes, exceptée une recrudescence des crues sur le Rhône supérieur et inférieur du I^{er} av. J.C. au I^{er} ap. J.C. (Provansal *et al.*, 1999), et plus précisément 50 av. à 100 ap. J.C. (Salvador *et al.*, 2005). Cet épisode est à corréliser avec les hauts niveaux G1, ou au moins une partie, la base pouvant être contemporaine de Hallstatt. On ne note pas, en domaine rhodano-alpin, de traces de déficit hydrique majeur entre 500 av. J.C. et 400/500 ap. J.C. Du II^e au III^e siècle ap. J.C., une circulation de l'air maritime océanique favoriserait le bassin du Rhône moyen, Orange se trouvant à la limite nord du climat méditerranéen (Provansal *et al.*, 1999). Dans cette ambiance de bilans hydriques dans l'ensemble positifs, les niveaux plutôt hauts de la phase G du lac de Paladru apparaissent moins étonnants. Le lac (ou le secteur du point carotté) semble lisser les événements à bilans déficitaires.

7.3 - UNE MAJORITÉ DE BAS NIVEAUX DE 500/400 À 1040 AP. J.C. (PHASES F, C ET A) ET DES PÉRIODES PLUS COURTES DE HAUTS NIVEAUX (PHASES E, D ET B)

La deuxième moitié du premier millénaire après J.C. apparaît clairement comme une succession de phases pluridécennales où les niveaux lacustres bas ou moyens l'emportent en durée sur les périodes de hauts niveaux. On décompte 300 à 350 années de périodes à bas niveaux lacustres (phases F, D2, C, A) pour 150 années de niveaux moyens (phases D1, E) et à peine 100 années de hauts niveaux affirmés (phases D3, B).

Fig. 10 : 1000 avant à 1000 après J.C., corrélations entre les fluctuations du lac de Paladru (1) et d'autres hydro et géosystèmes continentaux : (2) niveaux des lacs dans les Alpes et le Jura ((2a) Magny, 1993, (2b) Magny, 2004) ; (3) activité fluviale (Bravard, 1997 ; Provansal *et al.*, 1999 ; Berger, 2003) ; (4) évolution pédosédimentaire en moyenne vallée du Rhône (Berger & Brochier, 2006, à paraître) ; (5) avancées des glaciers dans les Alpes suisses ((5a) Zoller, 1977 ; Magny, 2001, (5b) Holzhauser *et al.*, 2005), (6) retraits des glaciers (Hormes *et al.*, 2001) ; (7) l'activité solaire d'après le ^{14}C résiduel (Damon *et al.*, 1989).

*Fig. 10: 1000 BC to 1000 AD, correlations between Paladru lake level fluctuations (1) and others continental hydro and geosystems: (2) lake levels in Alps and Jura ((2a) Magny, 1993, (2b) Magny, 2004); (3) fluvial activity (Bravard, 1997; Provansal *et al.*, 1999; Berger, 2003); (4) pedosedimentary evolution and fossil medieval soil in medium Rhône valley (Berger & Brochier, 2006); (5) glaciers advances in swiss Alps (5) ((5a) Zoller 1977; Magny, 2001, (5b) Holzhauser *et al.*, 2005); (6) recessions of glaciers (Hormes *et al.*, 2001); (7) solar activity after atmospheric residual ^{14}C variations (Damon *et al.*, 1989).*

7.3.1 - La phase de bas niveaux F, du VI^e au VIII^e siècle ap. J.C., marquée par une instabilité certaine, est un moment de rupture avec la sédimentation précédente et les conditions climatiques antérieures. Dans le bassin du Rhône, cette période est représentée par une crise hydrologique majeure (Provansal *et al.*, 1999 ; Salvador *et al.*, 2005). Dans les lacs des Alpes et du Jura (Bourget, Pluvius, Petit Maclu) est observée une phase régressive, plus précoce, étendue du milieu du III^e au milieu du VII^e ap. J.-C (Magny, 1993a, 2004). Le lac de Paladru n'enregistre une régression que deux siècles plus tard (particularité de même origine que les niveaux de la phase G2 qui restent hauts ?). En revanche, à partir du VI^e siècle ap. J.C., les sédiments du lac plaident pour un régime climatique à saisons contrastées, stress hydriques fréquents, et pluies concentrées, conforme avec la dynamique fluviale dans le bassin du Rhône moyen (fig. 10). Le fort retrait des glaciers observé dans les Alpes suisses pourrait aussi être dû à une pluviométrie moindre (Hormes *et al.*, 2001).

7.3.2 - Les phases à tendance transgressive E et D (de 700/750 à 890/895 ap. J.C.) trouvent un parallèle avec l'épisode de haut niveau dit Petit Maclu 2 dont le maximum transgressif se situerait entre 697 et 741 ap. J.C.

(Magny, 1992). Il se trouve au lac de Paladru entre 850 et 890 ap. J.C. (phase D3). La séquence dendrologique de Colletière révèle 3 à 4 années froides à fortes précipitations autour de 895-896 ap. J.C., période de famine mentionnée à divers endroits d'Europe (Alexandre *et al.*, 1993). Au cours des phases E et D, les milieux terrestres médio-rhodaniens ne connaissent pas de dérèglements hydrologiques, les pluies ne sont pas concentrées comme précédemment aux VI^e-VIII^e siècles ap. J.C. Le bilan hydrique est globalement positif, entraînant une élévation des nappes phréatiques. Les températures ne baissent pas car c'est à ce moment que s'accélère la sédimentation carbonatée pour atteindre le taux de 3 mm/an. Un déplacement des pluies vers la saison froide suffirait à maintenir un bilan positif.

7.3.3 - La phase transgressive B, de 946 à 974 ap. J.C. n'est pas observée ailleurs, ce qui peut relever de moyens d'analyses insuffisants. L'étude dendrologique du chêne révèle une série de mauvaises années de 942 à 944 ap. J.C., également repérées dans les séquences de Munich et de Liège, et connues dans les textes comme période de crise agraire due à un excès de pluie (*ibid*).

7.3.4 - Les phases C (890-895 à 946 ap. J.C.), puis A (974 à 1040 ap. J.C.) ont pour origine un bilan hydrique déficitaire qui conduit à un abaissement drastique du plan d'eau de 3 à 4 m au cours de l'occupation médiévale, produisant l'émersion de hauts fonds littoraux. Des déficits hydriques de 15 à 30 % sur le lac de Paladru seraient capables de générer des baisses de niveau de cette amplitude (Feyt, 1982).

L'étude isotopique de la teneur en ^{18}O , réalisée à partir de 55 analyses sur 110 cernes d'un tronc de chêne, conclut à l'existence autour de l'an Mil d'un climat plus sec qu'aujourd'hui et à l'alternance de périodes plus sèches ou humides, selon une périodicité de l'ordre d'une quarantaine d'années (Ferhi, 1993). Les teneurs les plus élevées de ^{18}O semblent contemporaines des années sèches 921-928 ap. J.C. et les plus basses aux années pluvieuses de la décennie 940-950 ap. J.C. ; la teneur des périodes plus humides ne se différencie pas fondamentalement de l'actuel.

Si l'analyse dendrologique des chênes de Colletière n'identifie pas les phases de sécheresse, comme semble-t-il la plupart des séquences d'arbres d'Europe centre-occidentale entre 876 et 1034 ap. J.C. (Alexandre *et al.*, 1993), les hêtres notent un déficit hydrique durant la deuxième moitié du X^e siècle ap. J.C., avec une accélération à partir de 970 ap. J.C. (Bourquin-Mignot, 2000). L'étude de cartulaires régionaux, essentiellement celui de l'abbaye de St André-le-Bas (Falque-Vert, *in letteris*) pointent deux périodes où il est fait fréquemment mention de ruisseaux à sec : 935-941 et 975-994 ap. J.C.

Sur d'autres lacs alpins, des bas niveaux sont connus, avec moins de précisions chronologiques, à Zürich (850-1100 ap. J.C.), au lac du Val (741 à 1007 ap. J.C.) (Magny, 1992, 2001). Les bas niveaux régressifs de Colletière sont synchrones dans le bassin médio-rhodanien d'un long moment de pause hydrologique et de stabilité morphologique marqué par la formation d'un sol brun du VII^e siècle au XII^e siècle ap. J.C. (Berger & Brochier, 2006 ; fig. 1 et 10). Dans un premier temps, du VIII^e au IX^e siècle ap. J.C., le bilan hydrologique reste positif, maintenant un haut niveau de nappe dans les basses plaines rhodaniennes (équivalent des phases E et D). Dans un deuxième temps, que l'on estime aux X^e et XI^e siècles ap. J.C. par analogie avec les phases C et A, la précipitation de carbonates secondaires dans le sol révèle que seule une période globalement plus sèche et surtout plus chaude, associée à une augmentation de l'évapotranspiration, a pu favoriser ce processus. Cette forte production carbonatée touche divers milieux, et se retrouve même en grottes (Brochier, 1983).

7.3.5 - Au lac de Paladru, la remontée du niveau d'1,5 à 2 m, après 1040 ap. J.C., est rapide ; elle détermine probablement le départ des hommes et favorise la très bonne conservation du matériel organique. Sur les lacs alpins et jurassiens, les phénomènes transgressifs apparaissent plus tard au XIII^e siècle ap. J.C., la régression se

prolongeant jusque vers 1160 ap. J.C. au lac de Joux (Magny, 1993b).

8 - DISCUSSION SUR LES DEUX PÉRIODES D'OPTIMUM CLIMATIQUE DE L'ANTIQUITÉ ET DU MOYEN ÂGE

Deux optima holocènes classiques se retrouvent à chacune des extrémités de la courbe des variations bathymétriques du lac de Paladru (fig. 10) : les épisodes régressifs de la fin de l'Âge de Bronze (phase I) et ceux du haut Moyen Âge (phases A-C). Ces moments de bas niveaux connus dans plusieurs lacs des Alpes et du Jura, de 1050 à 850 av. J.C. et de 900 à 1200 ap. J.C. sont liés pour Magny (1993a, 2004) à un forçage solaire correspondant au cycle de 2300 ans noté par la courbe du carbone 14 résiduel (Damon *et al.*, 1989) et de l'oxygène 18 dans les carottes de glace du Groenland (Dansgaard *et al.*, 1984). En revanche, la période de forte activité solaire et d'amélioration climatique, centrée sur le milieu du premier millénaire de notre ère (Magny 2001 ; Berger 2001), dit « optimum de l'Antiquité tardive », n'apparaît pas représenté de façon sensible au lac de Paladru, si ce n'est dans les phases régressives F qui commencent plus tardivement.

8.1 - L'OPTIMUM DE L'AN MIL

La période de basses eaux du lac de Paladru, qui va de 890-895 à 1040 ap. J.C., est due à un climat globalement plus chaud et plus sec pendant une centaine d'années, entrecoupée par une période plus humide, mais pas plus froide, de trente années entre 974 et 946 ap. J.C. Cette période (phases C à A) peut être corrélée avec ce que de nombreux auteurs ont qualifié de « petit optimum climatique médiéval » (Le Roy Ladurie, 1967 ; Lamb, 1977 ; Goudie, 1992).

Des observations tendent à démontrer la globalité de ce phénomène. Entre 800 et 1200 ap. J.C., les Vikings s'implantèrent au Groenland, la forêt canadienne s'étendait plus au nord et l'Ecosse avait une bonne production agricole (Schneider, 1984). La progression latitudinale de la forêt en Laponie est datée de 950 à 1140 ap. J.C. (Serre-Bachet, 1978). Les arbres de Scandinavie ont enregistré des températures estivales plus chaudes pour les décennies 920-940 et 960-1000 que pour les décennies 850-870 ou 1110-1160 ap. J.C. (Briffa *et al.*, 2000). Les annales de Corbie, Liège, Cologne, Hersfeld, Quedlimburg et Saint-Gall rapportent une succession d'années très sèches entre 974 et 995 ap. J.C. (Alexandre *et al.*, 1993). Le niveau des lacs dans le nord de l'Europe est bas aux X^e-XI^e siècles (Gaillard, 1985).

Les rôles respectifs de la pluviosité et de la température dans cette amélioration climatique sont discutés. Stine (1994) montre la généralisation de stress hydriques de la Californie à la Patagonie entre 892 et 1112 ap. J.C. d'après la position de souches d'arbres en bordure de lacs d'altitude. Pour lui, le phénomène repose

essentiellement sur les précipitations et non sur les températures ; il parle d'« Anomalie Médiévale Climatique » et non d'« optimum ». Les signes de réchauffement en Europe occidentale sont cependant convaincants. La forte production de craie lacustre du milieu du VIII^e à la fin du X^e siècle ap. J.C. au lac de Paladru en est un. La très forte progradation carbonatée des rives du lac de Paladru (fig. 2c), ou encore de celles du Loclat, en Suisse près de Neuchâtel (Brochier & Hadorn, en cours), nous ferait qualifier cette période de « mini-Crétacé holocène », pour insister (en forçant le trait) sur ce phénomène. Les carbonates secondaires du paléosol médiéval en moyenne vallée du Rhône sont également un signal thermique fort et un signe de forte évapotranspiration (Berger & Brochier, 2002). Les cerne des mélèzes du sud des Alpes révèlent de 1030 à 1120 des phases chaudes à été sec (Serre-Bachet, 1978) mais sur le pourtour méditerranéen la dendrologie montre une période de 970 à 1190 plus froide que celle de 1190 à 1450 ap. J.C. (Serre-Bachet, 1994).

Sans être exhaustif, ce rapide examen montre une bonne convergence d'ensemble, mais une forte hétérochronie des divers signaux observés qui résulte en partie de leur diversité, de la variété des lieux et sans doute aussi des moyens de datation. Du VII^e siècle au XI^e siècle ap. J.C., les rythmes hydroclimatiques observés à Colletière trouvent une bonne corrélation avec la courbe du carbone 14 résiduel atmosphérique dépendante de l'activité solaire (fig. 10). Les phases de hauts niveaux E-D et B sont à bilan hydrique positif, mais ne sont pas spécialement plus froides, et pourraient être voisines des températures actuelles comme semblent l'indiquer les analyses de ¹⁸O (Fehri, 1993). La présence de carbonates secondaires dans le paléosol médiéval médio-rhodanien à des latitudes proches du 45^e parallèle, plaide pour une remontée vers le nord du climat méditerranéen typique, à saison chaude et sèche prolongée, en association avec une modification du régime de circulation des vents dans le nord ouest de la zone méditerranéenne (Berger & Brochier, 2006). La phase transgressive B serait due à des remontées d'air maritime depuis le sud, ne faisant chuter ni la température, ni la production carbonatée.

8.2 - L'OPTIMUM DE L'ANTIQUITÉ TARDIVE

Centré sur le milieu du premier millénaire de notre ère, cet optimum est considéré comme le maximum d'un cycle de réchauffement du climat à égale distance entre les phases de refroidissement du premier Âge du Fer et du Petit Âge Glaciaire (Magny, 2001), il n'a pas laissé de traces évidentes dans les carottes étudiées ici du lac de Paladru.

La phase de bas niveaux F se corrèle avec une phase de forte activité solaire (fig. 10(7)). Toutefois, les hauts niveaux de la phase G2 des IV^e et V^e siècles ap. J.C. se trouvent également dans une phase de forte activité solaire ; ils montrent une légère tendance régressive qui est loin d'atteindre celle de la phase F. Contrairement à ce qui se passe aux X-XI^e siècles ap. J.C., c'est

la phase de haut niveau G2 qui est contemporaine de la formation d'un sol brun avec carbonates secondaires, semblable à celui du haut Moyen Âge (Berger & Brochier, 2006), la phase de bas niveaux, F, étant contemporaine de dérèglements hydrologiques (fig. 10).

8.3 - COMPARAISON ENTRE CES DEUX PÉRIODES D'AMÉLIORATION CLIMATIQUE

Les effets des modifications climatiques sur les sociétés humaines ont été discutés, principalement pour l'optimum médiéval (Anderson, 1981 ; Delors, 1990 ; Colardelle & Verdel, 1993), beaucoup moins pour celui de l'Antiquité tardive (Provansal *et al.*, 1999 ; Berger, 2001). Les effets de l'une et l'autre sur les géosystèmes apparaissent en tout cas différents. L'amélioration centrée autour de 500 ap. J.C. ne semble pas produire systématiquement des bas niveaux lacustres. La pédogenèse est de courte durée, d'un à deux siècles. Elle est précédée, et suivie d'une période de forte instabilité hydrologique, agressive tant en plaine que sur les versants (fig. 10). Par contre, la longue durée de calme paysager et de pédogenèses de plus de quatre siècles dans laquelle s'inscrit l'optimum médiéval confère au sol son enrichissement en matière organique et éléments nutritifs, ses qualités de structure par un long travail des micro-organismes, et donc sa bonne qualité agronomique. Un régime climatique chaud et sec avec pluies courtes d'été, sensible à partir de 890-895 ap. J.C. au lac de Paladru, contribue à un abaissement des nappes, à un meilleur drainage et à une possible amélioration des rendements, surtout ceux des cultures céréalières. Intervenant sur des sociétés dont l'économie repose sur une polyculture à dominante céréalière, c'est un paramètre à ne pas négliger (Colardelle & Verdel, 1993).

La comparaison de la courbe bathymétrique du lac de Paladru avec l'évolution des formations terrestres démontre que, pour des variations lacustres identiques, on observe des effets sur les sols différents selon le régime de la pluviosité mais aussi l'héritage de processus antérieurs. Le réchauffement et l'assèchement sensibles dès la fin du IX^e siècle ap. J.C. n'auraient pas eu le même effet s'ils n'avaient été précédés d'un à deux siècles de calme paysager favorable à la pédogenèse. L'« optimum » ne se résume pas à l'an Mil ; on peut le faire débiter dès 890-895 ap. J.C., mais on peut aussi y intégrer la formation du sol depuis le milieu du VIII^e siècle ap. J.C., voire même la succession de bas niveaux depuis le VI^e siècle qui, par le cumul de déficits hydriques, conduit à un abaissement aussi drastique du lac aux X-XI^e siècles.

9 - CONCLUSIONS

Les variations observées rentrent pour la plupart dans le cadre des interprétations climatiques connues pour cette partie de l'Europe (Magny, 1993a, 2004 ; Berger, 2001, 2003). Le haut niveau de résolution

chronologique permet de relever plusieurs rythmes dont les effets se superposent. Sont notés celui de l'activité solaire de 2000/2300 ans (phases I à A), et peut-être celui des macrorhythmes de 200 à 150 ans (phases : F, E+D, C+B+A). Le cycle des phases D3 à A fait apparaître une succession d'ondes de sécheresse ou d'humidité d'une amplitude de 30 à 50 ans. C'est la périodicité la plus longue et la plus rare observée actuellement dans le monde, où le retour des périodes sèches ou humides est plus habituellement de 2-4, 4-6 et 10-20 ans (Kayser *et al.*, 1990). Les microcycles de plus haute fréquence des phases C, B, et A appartiennent au microrhythme 2-4, 4-6 ans. Les rythmes pluriannuels/décennaux/pluridécennaux évoquent les effets de l'Oscillation de l'Atlantique Nord (NAO), comme cela a été remarqué sur le lac du Bourget voisin pour les six derniers siècles de notre ère (Chapron *et al.*, 2002).

Malgré l'absence de sites archéologiques connus, les sédiments du lac de Paladru notent l'existence d'activités humaines sur les versants du lac, dès le X^e siècle av. J.C. Par contre, alors que l'on connaît des sites gallo-romains autour du lac, ces occupations n'entraînent ni érosion, ni flux détritiques. L'exploitation des versants s'intensifiera au cours des V^e aux VIII^e siècles ap. J.C., bien avant que l'on ne connaisse, à l'an Mil, une phase d'occupation importante des rives, bénéficiant d'une importante baisse du niveau des eaux. L'impact de ces occupations sur le bassin versant sera marqué d'une rupture nette dans les sédimentations lacustres. Le flux détritiques anthropogène est clairement modulé par les baisses de niveau du lac qui l'augmentent ; il doit être réévalué en conséquence.

Entre Rhône et Alpes, les deux périodes d'amélioration autour de 1000 av. J.C. et de 1000 ap. J.C. sont les plus marquées, à la fois par des bilans hydriques déficitaires au niveau des lacs et, en milieu terrestre, par des pédogenèses intervenant au cours de longs cycles de calme morphosédimentaire de plusieurs siècles, remarquables à l'échelle de l'Holocène. L'amélioration centrée sur le milieu du premier millénaire d'après les fluctuations du carbone 14 résiduel apparaît moins déterminante sur les systèmes lacustres, fluviaux et édaphiques.

La combinaison des cycles climatiques de diverses fréquences produit des effets spécifiques sur les géosystèmes. Le facteur temps joue un rôle considérable, par la durée de chacune des phases bien sûr, mais aussi et peut-être plus par le rythme et l'ordre dans lesquels elles se succèdent. Ce n'est pas un événement, mais une succession particulière d'événements qui conduit aux très bas niveaux du lac de Paladru à l'an Mil et à la qualité des sols médiévaux entre Rhône et Alpes. A ce titre, l'optimum du X^e au milieu du XI^e siècle ap. J.C. apparaît comme un événement majeur et particulier de l'Holocène. Le terme d'« optimum climatique » est quelque peu réducteur par rapport à la complexité des phénomènes, car ce n'est pas tant le climat que des effets successifs (Bertrand, 2002) d'épisodes antérieurs qui sont également à l'origine des modifications constatées de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Colardelle et E. Verdel qui dirigent la fouille de Colletière et le programme de recherche pluridisciplinaire pour leur intérêt porté aux études paléoenvironnementales, ainsi que Mr. Falque-Vert pour ses informations provenant de cartulaires médiévaux, et les relecteurs, M. Magny, E. Verdel, ainsi que E. Lallier-Vergès et P. Deline, qui ont contribué à en améliorer le contenu.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEXANDRE P., LAMBERT G., & LAVIER C., 1993** - Dendrochronologie et climat en Europe occidentale de la fin du IX^e s. au début du XI^e siècle. In M. Colardelle & E. Verdel (eds.), *Les habitats du lac de Paladru dans leur environnement - La formation d'un terroir au XI^e siècle*. Documents d'Archéologie Françaises, Paris, **40**, 289-304.
- ANDERSON J.L., 1981** - History and climate : some economic models. In T.M.L. Wigley, M.J. Ingram & G. Farmer (eds.), *Climate and history*. Cambridge University Press, 337-355.
- ARNAUD F., REVEL M., CHAPRON E., DESMET M., & TRIBOVILLARD N., 2005** - 7200 years of Rhône river flooding activity in lake Le Bourget, France : a high resolution sediment record of NW Alps hydrology. *The Holocene*, **15**, 420-428.
- BERGER J.F., 2001** - Evolution des agro- et des hydrosystèmes dans la région médio-rhodanienne. In P. Ouzoulias, C. Pellecuer, C. Raynaud, P. Van Ossel & P. Garmy (dir.), *Les campagnes de la Gaule à la fin de l'Antiquité*. 4^e colloque AGER, Antibes, APDCA, 369-404.
- BERGER J.F., 2003** - Les étapes de la morphogenèse holocène dans le sud de la France. In S. Van der Leeuw, F. Favory & J.L. Fiches (dir.), *Archéologie et systèmes socio-environnementaux : Etudes multiscalaires sur la vallée du Rhône dans le programme ARCHEOMEDES*. CNRS ed., CRA 27, Sophia-Antipolis, 43-161.
- BERGER J.F., & BROCHIER J.L., 2006** - Les apports de la géoarchéologie à la connaissance des paysages et des climats de l'époque médiévale en moyenne vallée du Rhône. In O. Maufras (dir.), *Habitats, nécropoles et paysages dans la moyenne et basse vallée du Rhône (VII^e-XV^e s.)*. Documents d'Archéologie Française, Paris, **98**, 163-208.
- BERGER J.F., & BROCHIER J.L. (à paraître)** - *Histoire des paysages et du climat de la fin des temps glaciaires à nos jours en moyenne vallée du Rhône d'après les données des travaux archéologiques du TGV Méditerranée*. Documents d'Archéologie Française, Paris.
- BERTRAND G., 2002** - La discordance des temps. In H. Richard & A. Vignot (dir.), *Equilibres et ruptures dans les écosystèmes depuis 20 000 ans en Europe de l'Ouest*, Presses Universitaires Franc-Comtoises, Annales Littéraires, **730**, 45-51.
- BOCQUET A., 1997** - Archéologie et peuplement des Alpes françaises du Nord, du Néolithique aux âges des métaux. *L'Anthropologie*, Paris, Masson, **101**, 291-393.
- BOREL J.L., BROCHIER J.L., & LUNDSTROM-BAUDAIS K., 1985** - Water level fluctuations of the lake Paladru (Isère) in the Xth and XIth centuries AD. *Ecologia Mediterranea*, **XI**, 179-183.
- BOREL J.L., BRAVARD J.P., & MONTJUVENT G., 1990** - Pluvius, lac disparu : du retrait glaciaire à l'aménagement hydroélectrique. *Revue de Paléobiologie*, Genève, **4**, 101 p.
- BOREL J.L., BROCHIER J.L., & DRUART J.C., 1994** - Microlaminations lacustres : variations bathymétriques et climatiques avant l'an Mil sur le site de Colletière, lac de Paladru, France. *Quaternaire*, **5**, 105-111.
- BOURQUIN-MIGNOT C., 2000** - La forêt et les défrichements. L'exemple de Charavines-Colletière. In D. Rippmann & B. Neumeister-Taroni (dir.), *Les mangeurs de l'an 1000 - Archéologie et alimentation*. Alimentarium, 273-279.
- BRAVARD J.P., 1997** - Géoarchéologie des vallées alluviales de Rhône-Alpes depuis le Tardiglaciaire. *Documents d'Archéologie Rhône-Alpes*, Lyon, **15**, 129-150.
- BRIFFA K.R., 2000** - Annual climate variability in the Holocene : interpreting the message of ANCIENT TREES. *Quaternary Science Review*, **19**, 87-106.
- BROCHIER J.E., 1983** - Deux mille ans d'histoire du climat dans le midi de la France : étude sédimentologique. *Les Annales*, Paris, **2**, 425-438.

- BROCHIER J.L., & ESTIENNE P., 1988** - L'analyse d'image par ordinateur pour une méthode d'analyse stratigraphique. *Méthodes et concepts en stratigraphie du Quaternaire européen*, colloque international, Dijon, CNRS, préactes.
- BROCHIER J.L., & DRUART J.C., 1993** - Le milieu lacustre. In M. Colardelle & E. Verdel (eds.), *Les habitats du lac de Paladru dans leur environnement - La formation d'un terroir au XI^e siècle*. Documents d'Archéologie Françaises, Paris, **40**, 39-58.
- BUILLIT N., LALLIER-VERGES E., DISNAR J.R., & LOIZEAU J.L., 1997** - Changements climatiques et effets anthropiques au cours du dernier millénaire attesté par l'étude pétrographique de la matière organique (Annecy, Le Petit Lac ; France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, **68**, 573-583.
- CHAPRON E., DESMET M., DE PUTTER T., LOUTRE M.F., BECK C., & DECONINCK J.F., 2002** - Climatic variability in the northwestern Alps, France, as evidenced by 600 years of terrigenous sedimentation in lake Le Bourget. *The Holocene*, **12**, 177-185.
- CLERC J., MAGNY M., & MOUTHON J., 1989** - Histoire d'un milieu lacustre du Bas Dauphiné : le Grand Lemps. *Revue de Paléobiologie*, Genève, **8**, 1-19.
- COLARDELLE M., & VERDEL E. (dir.), 1993** - *Les habitats du lac de Paladru dans leur environnement : la formation d'un terroir au XI^e siècle*. Document d'Archéologie Française, Paris, **40**, 416 p.
- COLARDELLE M., & VERDEL E., 2000** - Charavines : l'habitat fortifié de Colletière. In D. Rippmann & B. Neumeister-Taroni (dir.), *Les mangeurs de l'an 1000 - Archéologie et alimentation*. Alimentaryum, 48-75.
- DAMON P.E., CHENG S., & LINICK T.W., 1989** - Fine and hyperfine structure in the spectrum of secular variations of atmospheric ¹⁴C. *Radiocarbon*, **31**, 704-718.
- DANSGAARD W., JOHNSEN S.J., CLAUSEN H.B., DAHL-JENSEN D., GUNDESTRUP N., HAMMER C.U., & OESCHGER H., 1984** - North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In J.E. Hansen, & T. Takahashi, (eds.), *Climate processes and climate sensitivity*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 228-98.
- DELORS R., 1993** - L'homme et la nature au Moyen Âge, paléoenvironnement des sociétés européennes. In M. Colardelle (dir.), *L'homme et la Nature au Moyen Âge*. Actes du V^e congrès international d'archéologie médiévale, Grenoble, Errance, 7-10.
- DRUART J.C., & PELLETIER J.P., 1998** - Variation de l'état trophique du lac d'Annecy (Haute Savoie, France) d'après l'analyse des diatomées et des pigments algaux dans quelques carottages. *Archives des Sciences*, Genève, **51**, 325-333.
- FEHRI A., 1993** - Oxygène 18 et paléoclimats. In M. Colardelle & E. Verdel (eds.), *Les habitats du lac de Paladru dans leur environnement - La formation d'un terroir au XI^e siècle*. Documents d'Archéologie Françaises, Paris, **40**, 121-127.
- FEUILLADE M., DOMINIK J., DRUART J.C., & LOISEAU J.L., 1994** - Trophic status Evolution of Lake Nantua as revealed by biological Records in sediment. *Archiv für Hydrobiologie*, **132**, 337-362.
- FEYT G., 1982** - *Éléments d'étude de l'hydrologie et de la paléohydrologie du lac de Charavines*. Mémoire de Maîtrise, Université de Grenoble, 46 p.
- FREYTTET P., & VERECCHIA E.P., 2002** - Lacustrine and palustrine carbonate petrography : an overview. *Journal of Paleolimnology*, **27**, 221-237.
- GAILLARD M.J., 1985** - Postglacial palaeoclimatic changes in Scandinavia and central Europe. A tentative correlation based on studies of lake level fluctuations. *Ecologia Mediterranea*, **XI**, 159-175.
- GOUDIE A., 1992** - *Environmental change, contemporary problems in Geography*. Clarendon Press, Oxford, 329 p.
- HIGGITT S.R., OLDFIELD F., & APLEBY P.G., 1991** - The record of land use change and soil erosion in the Late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, Eastern France. *The Holocene*, **1**, 14-28.
- HORMES A., MÜLLER B.U., & SCHLÜCHTER C., 2001** - The Alps with little ice : evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene*, **11**, 255-265.
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., & ZUMBÜHL H.J., 2005** - Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, **15**, 789-801.
- KAYSER N., PROBST J.L., CADET D., & TARDY Y., 1990** - Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **310**, s.II, 757-763.
- LAMB H.H., 1995** - *Climate, History and the modern world*. Routledge, London, 433 p.
- LE ROY LADURIE E., 1967** - *Histoire du climat depuis l'an Mil*. Flammarion, Paris, 376 p.
- LOTTER A.F., 1991** - Absolute dating of Late-Glacial period in Switzerland using annually laminated sediments. *Quaternary Research*, **35**, 321-330.
- MAGNY M., 1992** - Les fluctuations des lacs jurassiens et subalpins. Numéro spécial : le climat à la fin de l'Âge du Fer et dans l'Antiquité (500 BC-500 AD). *Les Nouvelles de l'Archéologie*, **50**, 32-36.
- MAGNY M., 1993a** - Solar influences on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric ¹⁴C record. *Quaternary research*, **40**, 1-9.
- MAGNY M., 1993b** - Les fluctuations des lacs jurassiens et subalpins et l'histoire du climat au Moyen Âge. *Histoire et Mesure*, **VIII**, 5-17.
- MAGNY M., 2001** - Les variations du niveau des lacs du Jura et des Alpes du Nord et leur signification pour une histoire du climat aux IV^e et V^e siècles de notre ère. In P. Ouzoulias, C. Pellecuer, C. Raynaud, P. Van Ossel & P. Garmy (dir.), *Les campagnes de la Gaule à la fin de l'Antiquité*. 4^e colloque AGER, Antibes, APDCA, 357-368.
- MAGNY M., 2004** - Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. *Quaternary International*, **113**, 65-79.
- MERKT J., 1971** - Zuverlässige Auszählungen von Jahresschichten in Seesedimenten mit Hilfe von Gross-Dünnschliffen. *Archiv für Hydrobiologie*, **69**, 145-154.
- MOSCARIELLO A., SCHNEIDER A.M., BENIER C. & DRUART J.C., 2000** - Holocene sediment record from lake Geneva, CH: a history of climate, environmental changes and human evolution. *Terra Nostra*, **7**, 70-76.
- NOËL H., GARBOLINO E., BRAUER A., LALLIER-VERGÈS E., BEAULIEU J.L. de, & DISNAR J.R., 2001** - Human impact and soil erosion during the last 5000 years as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at lac d'Annecy, the French Alps. *Journal of Paleolimnology*, **25**, 229-244.
- ODGAARD B.V., 1992** - The fire history of Danish heathland areas as reflected by pollen and charred particles in lake sediments. *The Holocene*, **2**, 218-226.
- PROVANSAL M., BERGER J.F., BRAVARD J.P., SALVADOR P.G., ARNAUD-FASSETA G., BRUNETON H., & VEROT-BOURRELY A., 1999** - Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au haut Moyen Âge. *Gallia*, **56**, 1-32.
- SAARNISTO M., 1986** - Annually laminated lake sediments. In B.E. Berglund (ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, 343-370.
- SALVADOR P.G., BERGER J.F., FONTUGNE M., & GAUTHIER E., 2005** - Etude des enregistrements sédimentaires holocènes des paléoméandres du Rhône dans le secteur des basses terres (Ain, Isère, France). *Quaternaire*, **16**, 315-328.
- SCHNEIDER M., 1984** - *The coevolution of climate and life*. New York, 563 p.
- SERRE-BACHET F., 1978** - The dendrochronological value of the European larch in the French maritime Alps. *Tree-Ring Bulletin*, **38**, 25 p.
- SERRE-BACHET F., 1994** - Middle Ages temperature reconstructions in Europe, a focus on northeastern Italy. *Climatic Changes*, **26**, 213-224.
- STINE S., 1994** - Extreme and persistent drought in California and Patagonia during mediaeval time. *Nature*, **369**, 546.
- STUIVER M., REIMER P.J., & REIMER R.W., 2000** - CALIB 4.3, Seattle, University of Washington and Belfast, Queen's University of Belfast, in conjunction with: Stuiver M., Reimer P.J., 1993. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.
- ZOLLER H., 1977** - Alter und Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Schweizer Alpen. In B. Frenzel (ed.), *Dendrochronologie und Klimaschwankungen in Europa*. Wiesbaden, 271-281.