

CHRONOLOGIE ET SPATIALISATION DE RETOMBÉES DE CENDRES VOLCANIQUES TARDIGLACIAIRES DANS LES MASSIFS DES VOSGES ET DU JURA, ET LE PLATEAU SUISSE



Anne-Véronique WALTER-SIMONNET¹, Gilles BOSSUET¹,
Anne-Lise DEVELLE², Carole BÉGEOT¹, Pascale RUFFALDI¹,
Michel MAGNY¹, Thierry ADATTE³, Michel ROSSY¹, Jean-Pierre SIMONNET¹,
Jacques-Louis de BEAULIEU⁴, Boris VANNIÈRE¹, Matthieu THIVET¹,
Laurent MILLET¹, Bruno REGENT¹ & Chantal WACKENHEIM¹

RÉSUMÉ

L'établissement d'une chronologie précise des différents événements climatiques du Tardiglaciaire et de l'Holocène nécessite l'emploi de différents moyens de datation. Parmi ceux-ci, la téphrochronologie apparaît comme un outil permettant à la fois une datation précise et une synchronisation à l'échelle inter-régionale de ces événements.

Dans le cadre de l'étude de l'enregistrement des variations du climat ayant régné en Europe de l'Ouest durant les 20 000 dernières années, des niveaux de téphras et de « cryptotéphras » ont été détectés dans des remplissages de lacs situés dans les massifs du Jura, des Vosges et sur le Plateau suisse. Certains de ces niveaux étant invisibles à l'œil nu, leur détection a été rendue possible grâce à l'emploi de la mesure de la susceptibilité magnétique à un pas de 5 mm.

Nos observations permettent de compléter l'extension géographique de la bordure ouest du nuage de dispersion méridional du Laacher See Tephra (env. 12900 ans, Eifel, Allemagne) déjà observé dans d'autres remplissages lacustres du Jura et de l'Europe de l'Ouest et du Nord. Dans les sites étudiés, les échardes de verre volcanique présentent des compositions chimiques comparables à celles des phases les plus jeunes du Laacher See Tephra. D'autres niveaux de téphras, non répertoriés jusqu'à présent dans cette région, ont été détectés et caractérisés. Deux niveaux, très discrets et uniquement présents dans les sites du massif du Jura et du Plateau suisse, sont caractérisés par des âges et compositions chimiques de phénocristaux compatibles avec les produits émis par le Puy de la Nugère (Chaîne des Puys, France) pendant l'Allerød (autour de 13300 ans). Les sites du massif des Vosges, quant à eux, sont caractérisés par l'occurrence d'un téphra rhyolitique, le Vedde Ash (env. 12000 ans), déposé durant le Dryas récent. Actuellement, il s'agit là de l'occurrence la plus méridio-occidentale de ce téphra. Nos résultats complètent la téphrochronologie tardiglaciaire de l'Est de la France et offrent donc un « pont » chronologique supplémentaire entre les séquences sédimentaires nord- et centre-européennes et celles situées plus à l'ouest. Ils soulignent l'importance du Laacher See Tephra et du Vedde Ash pour les études paléoenvironnementales dans cette partie de l'Europe puisque ces deux téphras encadrent la limite Allerød - Dryas récent et permettent, pour cet intervalle de temps, de pallier l'absence de données radiochronologiques.

Mots-clés : Téphrochronologie, Laacher See Tephra, Vedde Ash, Chaîne des Puys, Tardiglaciaire, Vosges, Jura, Suisse.

ABSTRACT

CHRONICLE AND DISTRIBUTION OF LATEGLACIAL TEPHRAS IN THE VOSGES AND JURA MOUNTAINS, AND THE SWISS PLATEAU

Establishment of a precise chronicle of the lateglacial and holocene climatic variations requires the use of various dating methods. Among them, tephrochronology allows high-resolution dating and synchronization of these events at a regional scale and sometimes at a continental scale.

Study of the record of the climatic variations occurring in western Europe since twenty thousands years leads to the discovery of tephra levels and "cryptotephra" in sediments cored in lakes from the Jura and Vosges mountains, and the Swiss plateau. Some of these levels are invisible to the naked eye. Their detection was obtained using magnetic susceptibility measurement with a 5 mm step along the cores.

¹ UMR 6249 CNRS Chrono-Environnement, UFR ST, Université de Franche-Comté, 16 route de Gray, F-25032 Besançon cedex.

Courriel : anne-veronique.walter@univ-fcomte.fr, gilles.bossuet@univ-fcomte.fr, carole.begeot@univ-fcomte.fr, pascale.ruffaldi@univ-fcomte.fr, michel.magny@univ-fcomte.fr, michel.rossy@univ-fcomte.fr, jean-pierre.simonnet@univ-fcomte.fr, boris.vanniere@univ-fcomte.fr, matthieu.thivet@univ-fcomte.fr, laurent.millet@univ-fcomte.fr, bruno.regent@univ-fcomte.fr, chantal.wackenheim@univ-fcomte.fr

² CEREGE, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, F-13 545 Aix-en-Provence. Courriel : develle@cerege.fr

³ Institut de Géologie, rue Emile Argand, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Suisse. Courriel : thierry.adatte@unine.ch

⁴ IMEP, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, Bâtiment Villemin, BP 80, F-13 545 Aix-en-Provence.

Courriel : Jacques-Louis.de-Beaulieu@univ.u-3mrs.fr

Our observations allow to complete the western boundary of the southern distribution of the Laacher See Tephra (ca. 12,900 yr, Eifel, Germany). This tephra has been already described in others lacustrine sequences from the Jura and the western and northern Europe. In the sites we have studied, the volcanic glass shards show geochemical compositions comparable to those of the youngest phases of the Laacher See Tephra eruption. Other tephra levels, never described in this region until then, have been detected and characterized. Two very discrete tephra levels, only observed in sites from the Jura and the Swiss plateau, present ages, mineral assemblages and chemical compositions close to those of tephra that were emitted by the Puy de la Nugère (Chaîne des Puys, France) during the Alleröd (about 13,300 yr). Sites from the Vosges mountains are characterized by the occurrence of the rhyolitic Vedde Ash (ca. 12,000 yr, from the Icelandic Katla volcano), deposited during the Younger Dryas. Presently, this is the most southwestern occurrence of the Vedde Ash. Our data make up the Eastern France Lateglacial tephrochronology and offer an additional chronological bridge between sedimentary sequences from northern and central Europe and those situated more westerly. They show the importance of the Laacher See Tephra and the Vedde Ash for palaeoenvironmental studies in western Europe since they are flanking the Alleröd-Younger Dryas transition and allow to compensate the lack of radiochronological data.

Key-words: Tephrochronology, Laacher See Tephra, Vedde Ash, Chaîne des Puys, Lateglacial, Vosges, Jura, Switzerland.

1 - INTRODUCTION

Le réchauffement climatique de la planète est à l'origine de nombreuses études visant à fournir des reconstitutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales de plus en plus fines destinées à modéliser le climat afin de mieux comprendre comment évolue le système actuel. De ce point de vue, la période Tardiglaciaire, qui s'étend de 15000 à 11500 ans, est particulièrement intéressante car elle présente un grand nombre de variations climatiques en un laps de temps très court à l'échelle du Quaternaire. Elle est donc au centre de nombreuses études paléoenvironnementales qui ont pour objectif de caractériser avec précision les événements rapides qui s'y sont produits. Une des difficultés majeures de cette approche est l'établissement d'une chronologie fine et détaillée des différents événements climatiques du Tardiglaciaire. Pour ce faire, la tephrochronologie apparaît comme un outil très performant permettant à la fois une datation précise et une synchronisation à l'échelle inter-régionale de ces événements (Wohlfarth, 1996).

Suivant les recommandations du groupe INTIMATE, les dépôts de tephra consécutifs aux éruptions volcaniques apparaissent comme des éléments clefs pour l'établissement d'une chronologie absolue du Tardiglaciaire et de l'Holocène en Europe (Turney *et al.*, 1997, 2004 ; Lowe *et al.*, 2001 ; Davies *et al.*, 2002 ; Wastegård, 2005). Au cours de ces deux périodes, différentes provinces volcaniques étaient actives en Europe dont le massif de l'Eifel (Allemagne), le Massif Central (France), l'Islande, l'Italie, les Pyrénées, la Grèce et la Turquie. Utilisés comme horizons marqueurs, les dépôts de téphras consécutifs aux éruptions majeures de ces différents centres éruptifs doivent améliorer l'assise chronologique des corrélations inter-régionales proposées à l'échelle de l'Europe de l'Ouest. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude. Elle fait partie d'un programme de reconnaissance systématique des niveaux de cendres volcaniques, utilisés comme marqueurs chrono-stratigraphiques, dans les remplissages lacustres et palustres des massifs des Vosges et du Jura et le Plateau suisse. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'occurrence de téphras déjà reconnus dans les régions voisines mais également de détecter de nouveaux horizons et contribuer à terme à l'établissement d'un

cadre tephrochronologique commun à l'Europe de l'Ouest.

2 - CHRONIQUE DU VOLCANISME TARDIGLACIAIRE EN EUROPE DE L'OUEST

2.1 - L'ISLANDE

Le complexe volcanique islandais se divise en deux groupes de volcans. Le groupe Grimsvötn-Kverfjöll et Veidvötn-Dyngjuföll, situé dans la partie nord de l'île, produit des basaltes tholéitiques. La partie sud-est de l'île est caractérisée par les édifices volcaniques Hekla et Katla dont les émissions sont de type basaltes alcalins, basaltes à olivine et rhyolites (Jakobsson, 1979 dans Davies *et al.*, 2002). Un des téphras les plus connus et dispersés provenant de ce complexe est le Vedde ash. Daté à 12 200 - 11 900 ans (Birks *et al.*, 1996), il se positionne stratigraphiquement dans le Dryas récent et est caractérisé par une composition bimodale : certaines échantillons volcaniques sont rhyolitiques, d'autres basaltiques. Un autre tephra est également remarquable pour cette période : le Borrobol Tephra (14 400 années varves ; Davies *et al.*, 2003). La dispersion de ces téphras s'étend du Groenland à la Scandinavie, au nord de l'Allemagne et de la Pologne, à l'Ecosse et à l'Atlantique nord (Dugmore *et al.*, 1995 ; Birks *et al.*, 1996 ; Pilcher *et al.*, 1995 ; Zillén *et al.*, 2002 ; Davies *et al.*, 2004, 2005 ; Wastegård, 2005). D'autres téphras d'origine islandaise ont été décrits, mais leur extension est très réduite (Davies *et al.*, 2002 ; Wastegård, 2005).

2.2 - LE MASSIF DE L'EIFEL (ALLEMAGNE)

Le complexe volcanique de l'Eifel est situé au sud-ouest de Bonn. Il est constitué d'un groupe de 240 cônes de scories, maars et petits stratovolcans qui recouvrent une surface d'environ 600 km². Les deux téphras principaux originaires de ce complexe sont le Laacher See Tephra (LST) et le Ulmener Maar Tephra (UMT). Le LST est le plus dispersé en Europe centrale (van den Bogaard & Schmincke, 1985 ; Juvigné, 1991 ; Juvigné *et al.*, 1995b ; Zolitschka *et al.*, 1995 ; Bossuet *et al.*, 1997 ; Moscariello & Costa, 1997 ; Litt *et al.*, 2001 ; Vannièr *et al.*, 2004). Les âges obtenus pour ce

dépôt sont $11\,230 \pm 40$ ^{14}C ans BP (Hadjas *et al.*, 1995) c'est-à-dire 13 180-13 094 ans (1 sigma), $12\,880 \pm 1$ % années varves (Brauer *et al.*, 1999 ; Friedrich *et al.*, 1999) et $12\,900 \pm 130$ ans BP par datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (van den Bogaard, 1995). Récemment, une datation utilisant la méthode de la moyenne mobile appliquée aux données radiocarbone et dendrochronologiques (sur *Pinus* et *Quercus*) d'Europe centrale, de Suisse et d'Allemagne, et la série varvée du bassin de Cariaco propose un âge d'environ 13 160 ans pour ce téphra (Friedrich *et al.*, 2004 ; Kromer *et al.*, 2004). De composition phonolitique, ce téphra est associé à une série d'éruptions pliniennes et phréatomagmatiques nommées Lower Laacher See Tephra (LLST), Middle Laacher See Tephra (MLST, divisée en plusieurs sous-phases) et Upper Laacher See Tephra (ULST) (van den Bogaard & Schmincke, 1985). En revanche, la dispersion de l'Ulmener Maar Tephra est plus restreinte puisqu'il n'a été détecté qu'en Allemagne où il a été daté à 11 000 années varves (Brauer *et al.*, 1999).

2.3 - LA PROVINCE ITALIENNE

Les nombreux téphras italiens tardiglaciaires sont attribués aux trois provinces magmatiques suivantes : la province campanienne, la province sicilienne et l'arc éolien. Les téphras émis par le Mont Somma, le Vésuve, Ischia et les Champs Phlégréens appartiennent à la province campanienne. Leur géochimie est phonolitique à trachybasaltique. Les téphras produits par la province sicilienne (Etna et Pantelleria) sont caractérisés par une chimie alcaline riche en sodium (avec basaltes tholéitiques, hawaïtes, benmoréites et trachytes) à peralcaline (ignimbrites trachytiques et rhyolitiques peralcalines). En revanche, ceux provenant des îles éoliennes se répartissent en deux groupes, l'un typiquement calco-alcalin souvent riche en potassium avec basalte, dacite, andésite et trachy-rhyolite potassique (Lipari, Salina) et l'autre calco-alcalin et alcalin potassiques avec basalte shoshonitique, téphrite à leucite, trachy-rhyolite potassique et andésite (Vulcano, Stromboli) (Simkin & Siebert, 1994 ; Peccerillo, 2005).

Pour cette période, les téphras les plus connus et enregistrés dans des dépôts lacustres ou marins sont le Lagno Amendolare (15 000 années varves), le Tufi Biancastri (14 000 à 18 000 ans, âge obtenu par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), le Napolitean Yellow Tuff (14 120 années varves) et le Pomici Principali (12 170 années varves) émis soit par les Champs Phlégréens, soit par le Vésuve (Delibrias *et al.*, 1979 ; Zolitschka & Negen-dank, 1996 ; Allen *et al.*, 1999 ; Wulf, 2000 ; Zanchetta *et al.*, 2000 ; Rolandi *et al.*, 1998 ; Siani *et al.*, 2004 ; Wulf *et al.*, 2004). Leur dispersion se cantonne en général au sud de l'Europe (Italie, Mers Tyrrhénienne, Adriatique, Ionienne, Egée, de Marmara, Noire et Méditerranée orientale, et les terres environnantes) excepté pour le Napolitean Yellow Tuff qui a été détecté dans le lac autrichien du Längsee (Schmidt *et al.*, 2002).

2.4 - LE MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

Après une période d'inactivité volcanique de 15 000 ans environ, la Chaîne des Puys a été le siège d'un volcanisme très actif durant le Tardiglaciaire. La nature des émissions volcaniques montre une tendance à l'évolution depuis des basaltes et trachy-basaltes jusqu'à des trachytes (Maury *et al.*, 1980 ; Boivin *et al.*, 2004). Depuis une quinzaine d'années, l'importance des éruptions est estimée à travers l'étude de la nature et de la répartition des téphras distaux, particulièrement en Limagne et dans la cuvette de Clermont-Ferrand. Leur extension est, pour l'instant, confinée au massif, à la Limagne et aux Monts du Forez (Etlicher *et al.*, 1987 ; Juvigné, 1987 ; Vernet *et al.*, 1990 ; Juvigné *et al.*, 1992 ; Juvigné *et al.*, 1995a ; Miallier *et al.*, 2004 a et b) ; leurs positions chronologiques relatives reposent sur des études palynologiques, des dates radiocarbone et TL, et la reconnaissance de recouvrements téphriques (Vivent & Vernet, 2001 ; Vernet & Raynal, 2004 ; Boivin *et al.*, 2004). Les principaux téphras distaux tardiglaciaires sont la retombée de la Cellule (trachy-andésite, Dryas ancien), le complexe téphrique CF1a/CF1b (âge moyen situé entre 13 000 et 14 000 ans) présent dans toute la Grande Limagne et dont la composition chimique évolue avec le temps depuis des trachy-andésites basaltiques jusqu'à des trachy-andésites, et la retombée de la Moutade (trachy-andésite basaltique, Allerød) observée en Limagne septentrionale. Le Puy de la Nugère est le volcan source proposé pour ces trois téphras (Boivin *et al.*, 2004). Les explosions phéatomagmatiques de ce Puy ont aussi généré le Téphra de Ravel (trachy-andésitique, 11 400 ans BP), dont le lobe de dispersion s'étend vers le sud-est en Limagne jusque dans les Monts du Forez (Etlicher *et al.*, 1987 ; Juvigné *et al.*, 1992). L'activité volcanique de la Chaîne des Puys se poursuit durant l'Holocène jusqu'au milieu du Sub-boréal.

3 - MÉTHODOLOGIE

Cette étude a été réalisée à partir de carottes prélevées dans des remplissages lacustres. Ces dernières ont été extraites manuellement à l'aide soit d'une sonde russe, soit d'une sonde à piston Livingstone, et placées, après description, dans des gaines en PVC. En attendant les analyses, les carottes ont été stockées en chambre froide.

A l'exception du Laacher See Tephra dont l'épaisseur varie de 1 mm dans le Jura à 3 mm dans le nord du massif des Vosges, les téphras que nous étudions sont invisibles à l'œil nu et correspondent au terme « cryptotephra » utilisé par nos collègues anglo-saxons (Lowe & Hunt, 2001 ; Turney *et al.*, 2004). Leur détection est réalisée soit par le biais de mesures de susceptibilité magnétique le long des carottes de sédiments auscultées tous les 5 mm (la présence d'un téphra modifie le signal magnétique dans la plupart des cas : on observe un pic de susceptibilité magnétique), soit

par des prélèvements systématiques tous les centimètres dans lesquels la présence de particules de verre volcanique est vérifiée en frottis. Ces deux méthodes de détection sont utilisées dans des optiques différentes : la corrélation de sites au niveau régional voire continental est plutôt réalisée via la susceptibilité magnétique, méthode rapide non destructive et mettant en évidence les téphras majeurs, alors que la chronologie fine d'un carottage est obtenue via un échantillonnage systématique. Cette deuxième méthode apparaît coûteuse en temps mais elle permet d'avoir accès à des téphras très discrets qui ne provoquent pas de variation du signal significative lors de la mesure de la susceptibilité magnétique. Lorsqu'un pic de susceptibilité magnétique est enregistré, le sédiment est échantillonné tous les centimètres sur toute l'épaisseur du pic, puis la présence d'échardes de verre volcanique et de phénocristaux est vérifiée dans chaque échantillon.

Remonter au volcan source d'un téphra, puis éventuellement à son âge, nécessite la caractérisation minéralogique du dépôt et l'analyse géochimique de ses différents composants (échardes de verre volcanique et phénocristaux). Leur séparation est réalisée en suivant le protocole proposé par Blockley *et al.* (2004) légèrement modifié en tenant compte de celui de Turney (1998) et de la nature des sédiments rencontrés. Ce protocole combine une destruction des carbonates par attaque acide et de la matière organique par digestion, un tamisage, une élimination de la fraction organique siliceuse et une séparation des échardes de verre et des phénocristaux par liqueur dense. Leur caractérisation

est ensuite obtenue par le biais d'observations au microscope optique et au microscope à balayage, et d'analyses chimiques (éléments majeurs essentiellement) à la microsonde électronique. Les analyses chimiques des verres volcaniques présentées dans la suite de cet article ont été réalisées sur la microsonde électronique Camebax SX50 du Centre de microanalyse CAMPARIS de l'Université P. et M. Curie de Paris (15keV, 10nA, taille du faisceau : 4 micromètres) sur section polie de grains inclus dans de la résine.

4 - SITES ÉTUDIÉS

Les sites étudiés se répartissent dans l'ouest du massif du Jura (étang du Lautrey et lac d'Onoz, France), sur le Plateau suisse (lac Gerzensee, Suisse) et dans le massif des Vosges (lac de Sewen et marais de la Maxe, France) (fig. 1 et 2).

4.1 - LE MASSIF DU JURA

L'étang du Lautrey (46°35'14" N, 5°51'50" E) est situé à 788 m d'altitude au contact entre le plateau calcaire et la Haute Chaîne du Jura. Cette dépression de 0,1 km² repose sur le substratum mésozoïque (jurassique et crétacé) et est actuellement presque entièrement remplie par des dépôts lacustres quaternaires dans lesquels subsiste une mare résiduelle (Guillaume & Guillaume, 1962). L'inclinaison (10°SE) du substratum et la présence d'une structure tectonique de type

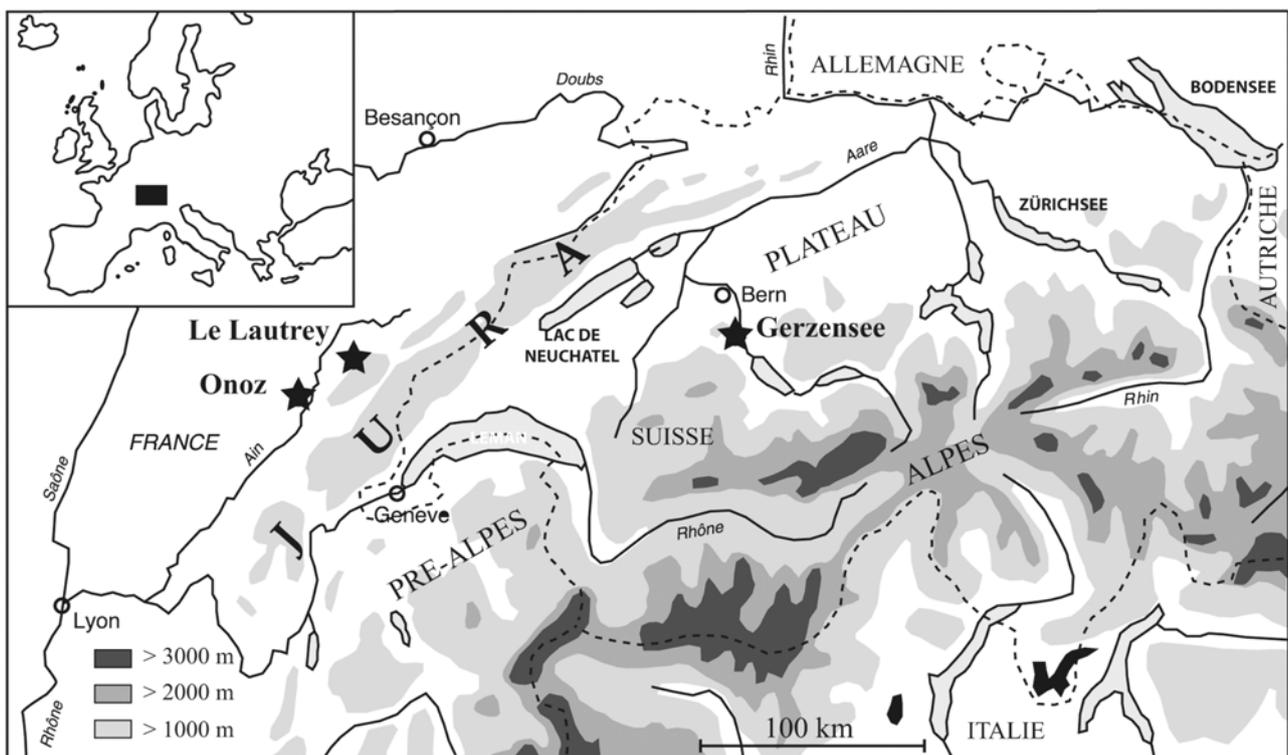


Fig. 1 : Localisation géographique des sites du lac d'Onoz, de l'étang du Lautrey et du Gerzensee.
Fig. 1: Location of lakes Onoz, Lautrey and Gerzensee.

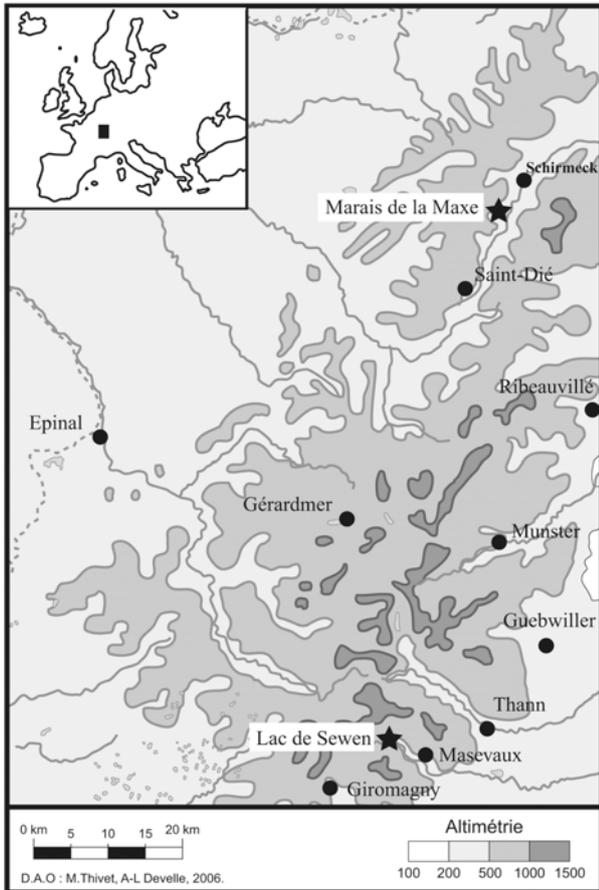


Fig. 2 : Localisation géographique des sites du lac de Sewen et du marais de la Maxe.

Fig. 2: Location of lake Sewen and mire Maxe.

bloc basculé expliquent les variations de l'épaisseur du remplissage qui atteint 12 m dans la partie la plus profonde de la cuvette (Bossuet *et al.*, 2000). Ce remplissage montre une séquence typique de comblement débutant par des sédiments détritiques (graviers puis argiles silteuses laminées gris foncé) à la base, puis une partie médiane constituée d'une alternance de niveaux de craie lacustre plus ou moins argileuse et d'un dépôt d'argiles grises, et enfin des sédiments tourbeux (gyttja et tourbe) au sommet (fig. 3). La chronologie des dépôts repose sur une analyse palynologique, les associations de chironomes, des dates radiocarbone et la présence d'un niveau de cendres volcaniques dont le cortège minéral correspond à celui du Laacher See Tephra (Bossuet *et al.*, 1997 ; Bégeot *et al.*, 2000 ; Bégeot, 2000 ; Vannière *et al.*, 2004 ; Magny *et al.*, 2006).

Le lac d'Onoz (46°28'35" N, 5°39'14" E) se situe au sud-ouest des plateaux du massif jurassien, dans une dépression située entre Orgelet et le lac de Vouglans, à 560 m d'altitude. Il représente la partie résiduelle d'un lac installé dans cette dépression après le retrait glaciaire et est alimenté par un petit bassin versant d'environ 2 km². Il repose sur un substratum d'âge jurassien, plissé et faillé, et est entouré de dépôts glaciaires (Kerrien *et al.*, 1982). La stratigraphie établie dans la partie nord de la cuvette lacustre montre une séquence-type

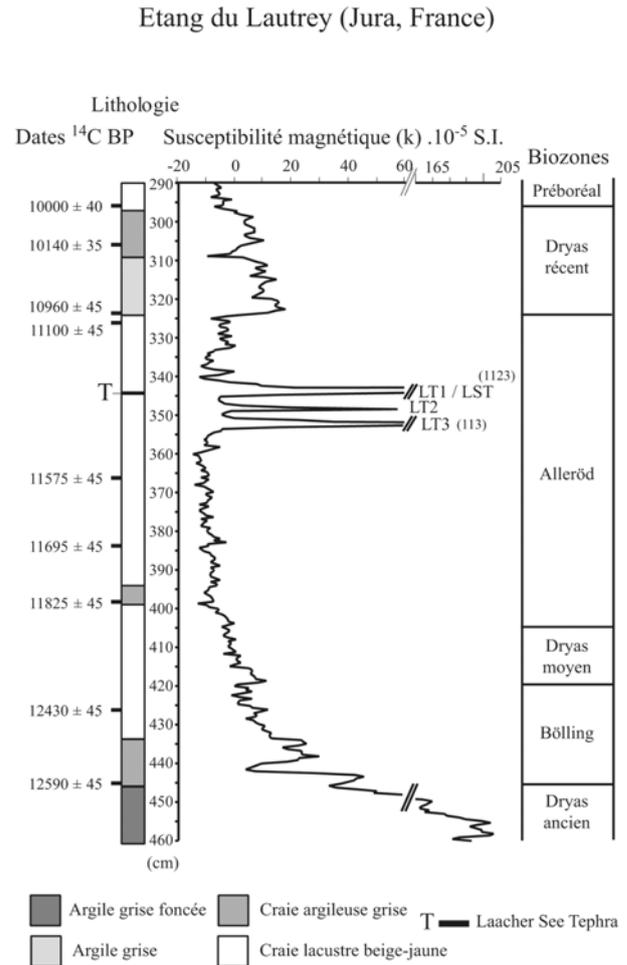


Fig. 3 : Lithostratigraphie, susceptibilité magnétique, âges radiocarbone et biozones (obtenues par les assemblages polliniques ; Bossuet *et al.*, 1997 ; Bégeot *et al.*, 2000 ; Bégeot, 2000 ; Vannière *et al.*, 2004 ; Magny *et al.*, 2006) des sédiments carottés dans l'étang du Lautrey.

Fig. 3: Lithostratigraphy, magnetic susceptibility, radiocarbon dating and biozones (obtained by palynology; Bossuet *et al.*, 1997; Bégeot *et al.*, 2000; Bégeot, 2000; Vannière *et al.*, 2004; Magny *et al.*, 2006) for lake Lautrey.

de comblement avec, à la base, des silts correspondant au début du Tardiglaciaire, un ensemble médian constitué de craies lacustres et, au sommet, une couche de sédiments organiques marquant l'atterrissement du site. La chronologie du site repose sur l'analyse palynologique et la présence d'un niveau de cendres volcaniques attribué à l'éruption du Laacher See (fig. 4) (Magny & Ruffaldi, 1994).

4.2 - LE PLATEAU SUISSE

Le Gerzensee (canton de Berne, 46°49'51" N, 7°32'48" E) est situé sur le Plateau suisse à la frontière des Alpes, sur le versant sud de la colline de Belpberg, à 603 m d'altitude. Ce lac a une profondeur maximale de 10 m, une longueur maximale de 1100 m pour une largeur maximale de 300 m, et une surface de 0,25 km². Son bassin versant topographique couvre une superficie de 2,6 km². Le lac repose sur un substratum formé de

Lac d'Onoz (Jura, France)

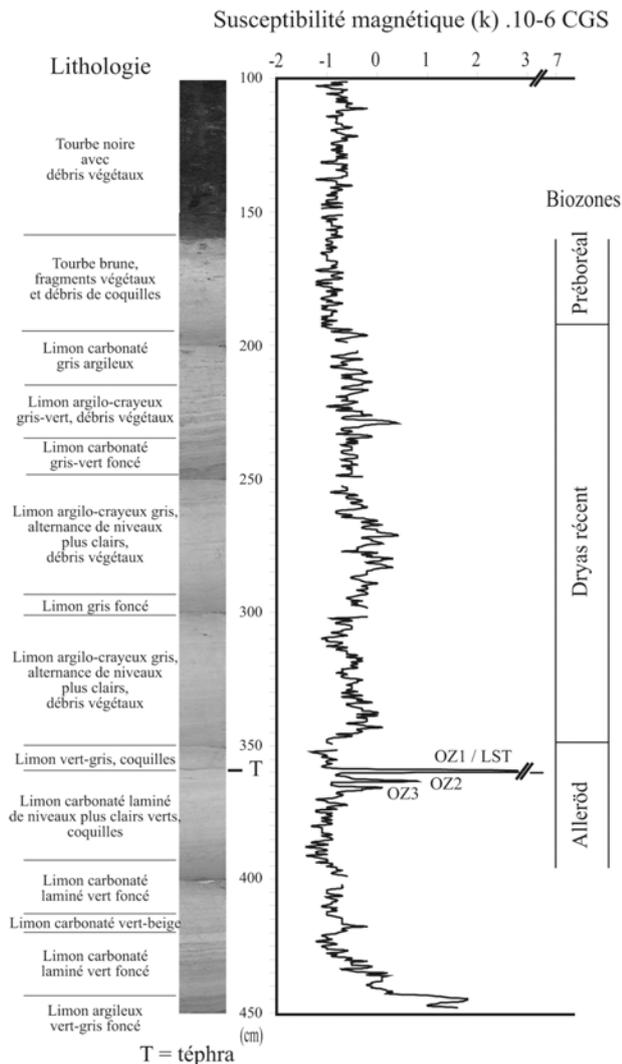


Fig. 4 : Lithostratigraphie, susceptibilité magnétique et biozones (obtenues par les assemblages polliniques ; Magny & Ruffaldi, 1994) des sédiments carottés dans le site du lac d'Onoz.

Fig. 4: Lithostratigraphy, magnetic susceptibility and biozones (obtained by palynology; Magny & Ruffaldi, 1994) for lake Onoz.

sédiments marins clastiques du Miocène et fut formé à la fin de la dernière glaciation (Lotter *et al.*, 2000). Depuis une trentaine d'années, il a fait l'objet de nombreuses études paléoenvironnementales qui ont conduit, entre autres résultats, à la mise en évidence d'une oscillation climatique rapide (Oscillation du Gerzensee) dont l'impact est à l'échelle de tout le continent Nord Européen (Eicher & Siegenthaler, 1976 ; Wolfarth, 1996 ; Wick, 2000). La stratigraphie montre la présence d'argiles grises foncées à vertes et grises à la base, puis une alternance de dépôts de craie lacustre plus ou moins argileuse et organique et de niveaux tourbeux (fig. 5). La chronologie des dépôts repose sur des études palynologiques, des dates radiocarbone et la présence du Laacher See Tephra (Eicher, 1980 ; Wick, 2000).

Gerzensee (canton de Berne, CH)

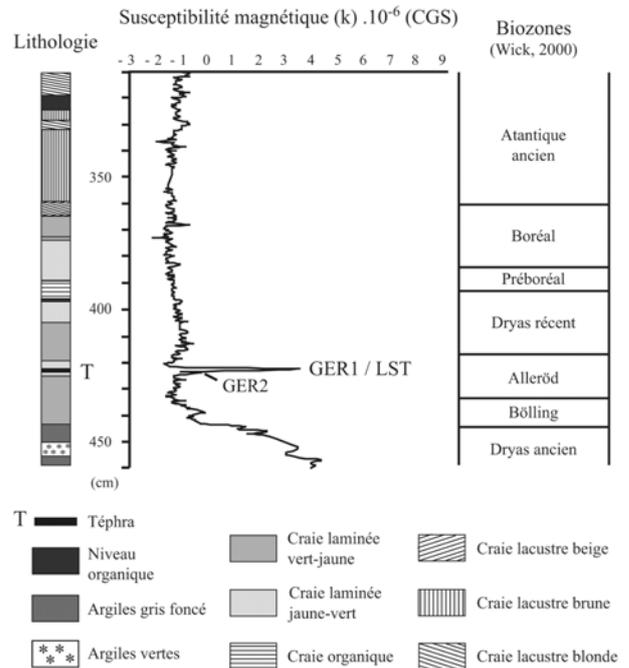


Fig. 5 : Lithostratigraphie, susceptibilité magnétique et biozones (obtenues par les assemblages polliniques ; Wick, 2000 ; Magny, 2001) des sédiments carottés dans le site du Gerzensee.

Fig. 5: Lithostratigraphy, magnetic susceptibility and biozones (obtained by palynology; Wick, 2000; Magny, 2001) for Gerzensee.

4.3 - LE MASSIF DES VOSGES

Le lac de Sewen (47°48'42" N, 6°53'50" E) est situé à 500 m d'altitude dans le fond de la vallée glaciaire de Masevaux, au nord de Belfort (Vosges cristallines). Formé après la dernière glaciation, il repose sur un substratum constitué de granite (« granite fondamental ») et de brèches, tufs et roches volcaniques datés du Viséen (Théobald *et al.*, 1973). Il est entouré d'une tourbière et s'insère dans des dépôts glaciaires et fluvioglaciaires du Würm. Son bassin versant topographique couvre environ 8 km². La stratigraphie établie à l'extrémité sud-est du lac montre des argiles grises et roses laminées à la base, puis des argiles verdâtres et grises recouvertes par des argiles brunes à beiges surmontées de gyttja et de tourbes (fig. 6). La chronologie de ces dépôts est établie à partir de l'analyse palynologique et de dates radiocarbone (fig. 6, tab. 1).

Le marais de la Maxe (anciennement Maxmoor, 48°27'18" N, 7°07'28" E) se trouve à 656 m d'altitude dans les Vosges gréseuses au sud-ouest de Schirmeck. Ce marais occupe la cuvette d'un ancien lac glaciaire creusé dans un substratum gréseux du Buntsandstein et barré par le Rond Pertuis (849 m) au nord, la Tête de la Maxe (860 m) au sud-ouest et des moraines (Riss et Würm) au sud-est (Ménillet *et al.*, 1978). Il draine actuellement un petit bassin versant de 0,2 km². Le remplissage débute par des argiles beiges à fins lits

Lac de Sewen (Haut-Rhin, France)

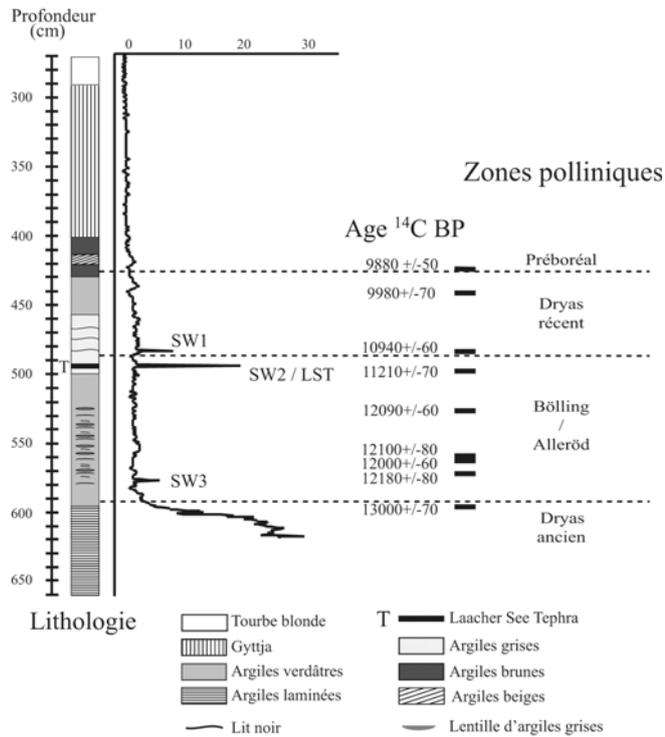
Susceptibilité magnétique (k) .10⁻⁶ CGS

Fig. 6 : Lithostratigraphie, susceptibilité magnétique, âges radiocarbones, diagramme pollinique simplifié et biozones des sédiments carottés dans le site du lac de Sewen.

Fig. 6: Lithostratigraphy, magnetic susceptibility, radiocarbon dating and biozones (obtained by palynology) for lake Sewen.

roses puis grises séparées par un niveau de gyttja. La partie médiane est constituée de gyttja surmontée de tourbe blonde et brune contenant des niveaux d'argiles brunes jusqu'au sommet (fig. 7). La chronologie de ces dépôts a été établie par l'analyse palynologique, une date radiocarbones (tab. 1) et la présence du Laacher See Tephra (Firbas *et al.*, 1948 ; D. Bressan & J.N. Haas, comm. perso.).

4 - RÉSULTATS

La figure 8 présente une corrélation entre les cinq enregistrements sédimentaires construite sur la base de la présence du Laacher See Tephra, des palynozones et des dates radiocarbones. Dans chaque site, la mesure de la susceptibilité magnétique montre une forte variation engendrée par la présence du Laacher See Tephra. D'autres pics de susceptibilité magnétique, plus modestes, sont observés. Tous ces pics ont été échantillonnés. Leur observation en frottis montre que seuls certains d'entre eux sont liés à la présence de niveaux de cendres volcaniques ; les autres semblent être liés à

Marais de la Maxe (Bas-Rhin, France)

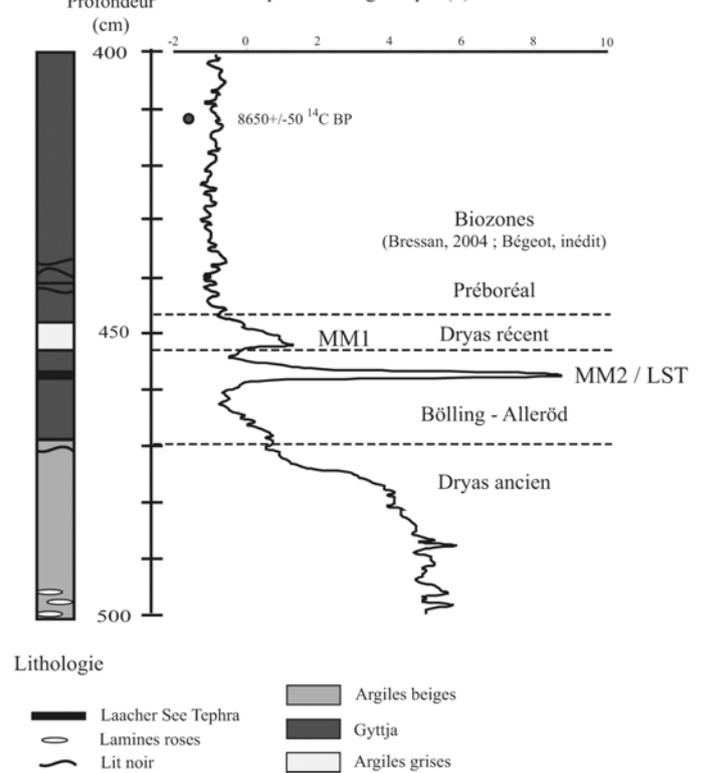
Susceptibilité magnétique (k) .10⁻⁶ CGS

Fig. 7 : Lithostratigraphie, susceptibilité magnétique, âge radiocarbones et biozones (obtenues par les assemblages polliniques ; Firbas *et al.*, 1948 ; D. Bressan & J.N. Haas, communication personnelle) des sédiments carottés dans le Marais de la Maxe.

*Fig. 7: Lithostratigraphy, magnetic susceptibility, radiocarbon dating and biozones (obtained by palynology; Firbas *et al.*, 1948; D. Bressan & J.N. Haas, personal communication) for mire Maxe.*

l'augmentation ponctuelle de la présence d'oxydes. Les analyses minéralogiques et géochimiques présentées ci-dessous ont donc été menées sur ces douze niveaux de tephra : le Laacher See Tephra (pics LT1/LST, OZ1/LST, GER1/LST, SW2/LST et MM2/LST), les tephra déposés durant l'Alleröd et antérieurs au Laacher See Tephra (pics LT2, LT3, OZ2, OZ3 et GER2) et ceux déposés durant le Dryas récent (pics MM1 et SW1). Les similitudes dans la réponse de la susceptibilité magnétique entre les cinq enregistrements présentés et les positions des différents tephra permettent dans un premier temps de proposer que les pics MM1 et SW1 représentent le même tephra, tout comme les pics LT2, OZ2 et GER2, et les pics LT3 et OZ3 (fig. 8).

4.1 - LE LAACHER SEE TEPHRA

Le Laacher See Tephra est observé dans tous les sites de cette étude et y présente les mêmes caractéristiques minéralogiques. Son cortège minéral est typique de celui d'une phonolite avec des phénocristaux de sanidine, plagioclase, haüyne et sphène, et la présence de

Site	Profondeur (cm)	Matériel	Age radiocarbone (année BP)	Numéro Labo.
Lac de Sewen	377-378	Macrorestes végétaux	9630 ± 50	Poz-19069
	424-425	Macrorestes végétaux	9880 ± 50	Poz-16521
	442-443	Macrorestes végétaux	9980 ± 70	Poz-19050
	483-484	Charbon	10940 ± 60	Poz-16522
	495-496	Macrorestes végétaux	11210 ± 60	Poz-19053
	525-526	Macrorestes végétaux	12090 ± 60	Poz-19054
	556-557	Tourbe	12100 ± 80	Poz-16732
	561-562	Tourbe	12000 ± 60	Poz-16731
	567-568	Macrorestes végétaux	12180 ± 80	Poz-16523
	591-592	Macrorestes végétaux	13000 ± 70	Poz-19055
Marais de la Maxe	412-413	Tourbe	8650 ± 50	Poz-16705

Poznan Radiocarbon Laboratory (Pologne). Calibration avec le logiciel Calib Rev 5.1beta (Reimer et al., 2004).

Tab. 1 : Dates radiocarbone obtenues sur des macrorestes et des échantillons de tourbe provenant des carottes prélevées au lac de Sewen et au marais de la Maxe.

Tab. 1: AMS Radiocarbon dates obtained from cores of lake Sewen and mire la Maxe.

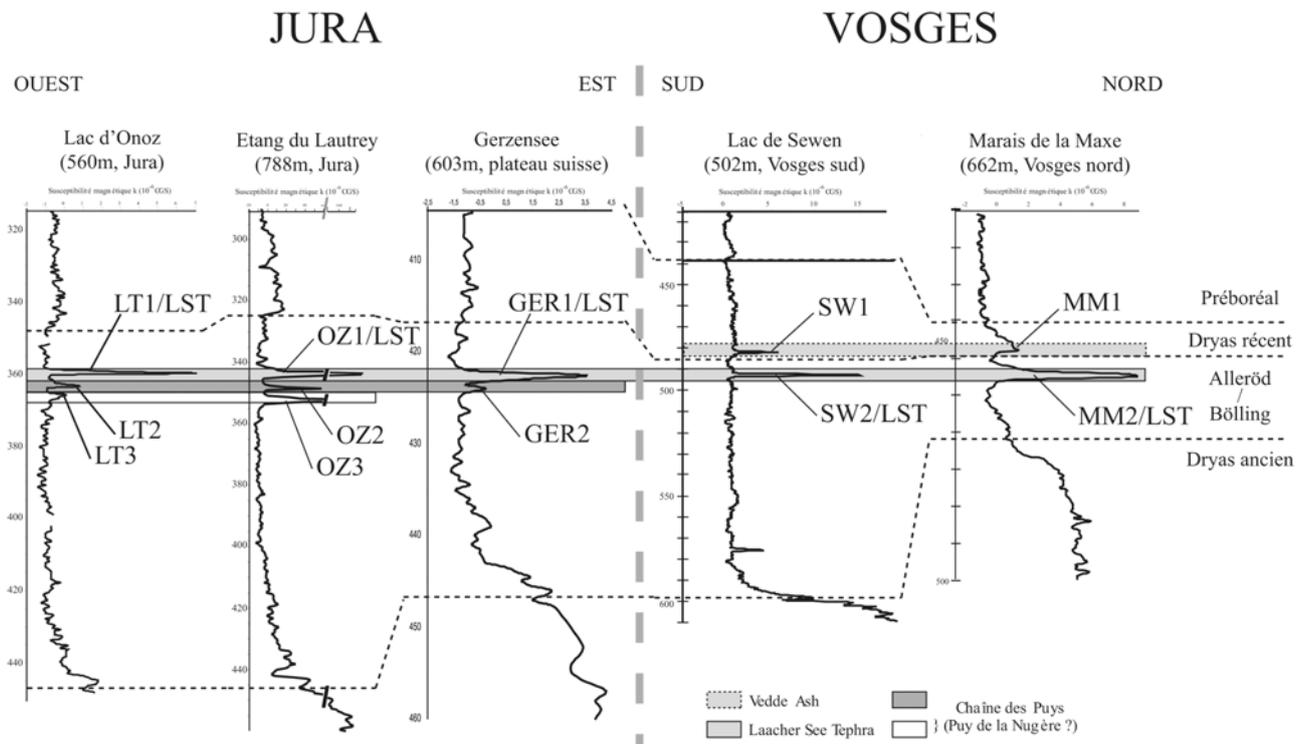


Fig. 8 : Corrélation entre les cinq sites établie sur la base des pics de susceptibilité magnétique correspondant à la présence de téphras et des biozones. La dénomination des pics est conforme à celle utilisée dans les figures 3 à 7.

Fig. 8: Correlation between the five sites. The correlation was built up from magnetic susceptibility peaks corresponding to tephras and biozones. The peaks names are those used in figures 3 to 7.

jadéite. Les échantillons de verre volcanique sont soit incolores, soit bruns et contiennent soit des grosses, soit des petites vacuoles (fig. 9A). Les analyses chimiques du verre volcanique sont celles d'une phonolite (tab. 2) et en accord avec les données antérieures obtenues sur le Laacher See Tephra dans d'autres sites (fig. 10a) (van den Bogaard & Schmincke, 1985; Friedrich *et al.*, 1999; Brauer *et al.*, 1999). Aucune différence de composition chimique n'a été notée entre les échantillons de verre incolores et les bruns, mais,

d'une part, les analyses réalisées ne concernent que les éléments majeurs, et, d'autre part, le nombre d'analyses effectuées ne sont statistiquement pas suffisantes pour en tirer ne serait-ce qu'une tendance. L'étalement des analyses dans les diagrammes Na₂O / K₂O (fig. 10b) et FeO / TiO₂ (fig. 10c) montre que les niveaux de Laacher See Tephra analysés ici appartiennent plutôt aux phases éruptives MLST et ULST (phase phréatomagmatique) décrites par van den Bogaard & Schmincke (1985), c'est-à-dire aux phases

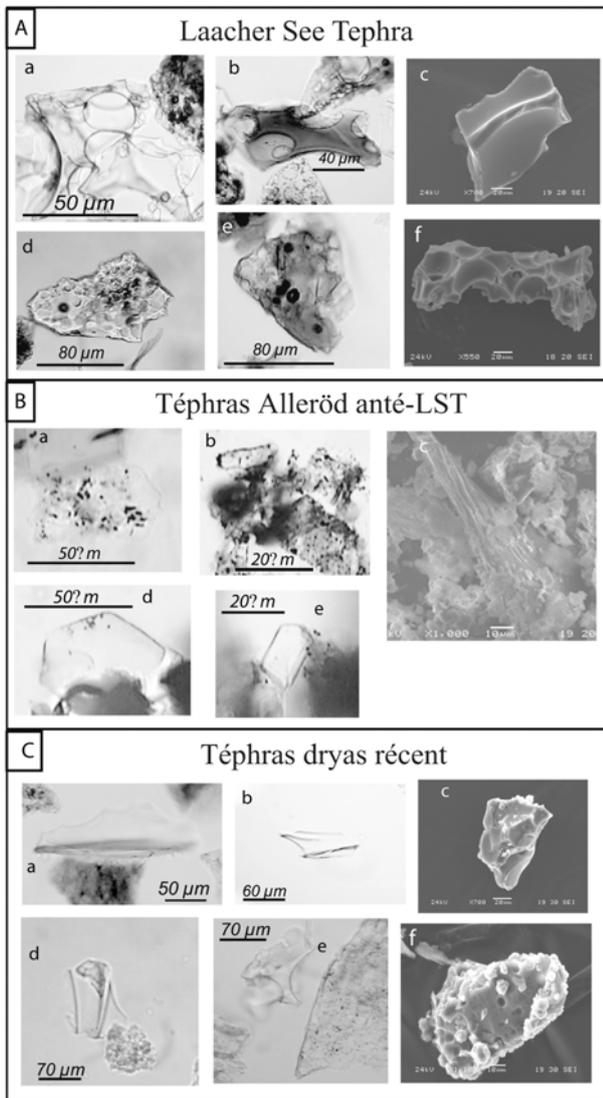


Fig. 9 : Photographies de phénocristaux et échantons de verre volcanique réalisées au microscope optique et au microscope électronique à balayage. A - Laacher See Tephra, a à f : échantons de verre volcanique ; B - Téphras Allerød anté-LST, a à c : verre volcanique très altéré, d : mica, e : plagioclase ; C - Téphras Dryas récent, a à f : échantons de verre volcanique.

Fig. 9: Phenocrysts and volcanic glass shards photographs using optical microscopy and scanning electronic microscope. A - Laacher See Tephra, a to f: volcanic glass shards; B - Tephtras that are Allerød and anterior to LST, a to c: very altered volcanic glass, d: mica, e: plagioclase; C - Younger Dryas tephtras, a to f: volcanic glass shards.

intermédiaire et ultime de l'éruption. Les valeurs obtenues sur les sites du Lautrey et de Sewen semblent plus regroupées que les valeurs obtenues sur les autres sites. Une première hypothèse voudrait que l'étalement des valeurs soit l'effet d'un début très discret d'altération des verres suggéré par leur teneur importante en eau. Or les données provenant du site de Sewen sont les seules dont les rapports Al_2O_3 / SiO_2 et $(Na_2O+K_2O) / Al_2O_3$ montrent une légère tendance à décroître avec l'augmentation de la teneur en eau (assimilée, faute de mieux, au complément à 100 % de chaque analyse). Les données provenant des autres sites ne montrent aucune tendance. Ceci semble indiquer que ces verres, bien que très hydratés, ne sont pas altérés au point de voir leur composition chimique modifiée et

inutilisable. L'étalement des valeurs dans les figures 10b et 10c est donc la conséquence soit du tri par densité et taille des particules pendant le transport des cendres, soit du tamisage de l'échantillon intervenant dans le protocole analytique, ou encore simplement d'un effet lié au nombre parfois réduit d'échantons analysés (de 7 à 21 selon le téphra) sans que l'on puisse choisir entre ces trois hypothèses.

4.2 - LES TÉPHRAS ALLERØD ANTÉRIEURS AU LAACHER SEE TEPHRA

Dans les sites du Jura et du Plateau suisse, le Laacher See Tephra est précédé par deux niveaux de téphras dans les sites du Lautrey et d'Onoz et d'un seul, discret, dans le site du Gerzensee. Ces niveaux de téphras ont pour point commun d'être constitués d'échantons de verre volcanique contenant des bulles et si altéré (zéolitisation, d'après les résultats de la diffraction des rayons X effectuée à Institut de Géologie de Neuchâtel, CH) que sa composition chimique en est rendue inutilisable (fig. 9B a-c, tab. 3). En revanche, les cortèges minéraux montrent des phénocristaux très propres de plagioclase (fig. 9B d) associés à de l'augite, de l'orthose, de l'albite, du sphène, du spinelle, des micas blancs, et de l'olivine magnésienne ($Fe_{0,5}$, uniquement dans le dépôt LT2). A l'exception des plagioclases (tab. 3), les compositions chimiques (obtenues à la microsonde électronique) de la plupart de ces minéraux semblent modifiées par un début d'altération. L'altération du verre volcanique constituant ces deux téphras ne permet donc pas de caractériser le ou les volcans sources. En revanche, à partir des dates radiocarbone obtenues sur le site du Lautrey (tab. 2), et considérant un taux de sédimentation constant entre le Laacher See Tephra sus-jacent et le niveau sous-jacent daté par radiocarbone (à 366 cm), les âges de ces deux téphras peuvent être estimés. Selon l'âge attribué au Laacher See Tephra (13 180-13 094 ans (Hadjas *et al.*, 1995), $12\,880 \pm 1$ % années varves (Brauer *et al.*, 1999 ; Friedrich *et al.*, 1999) ou 13 160 ans (Friedrich *et al.*, 2004 ; Kromer *et al.*, 2004), on obtient une fourchette d'âge d'environ 13 300-12 880 ans pour LT2 et 13 420-13 010 ans pour LT3. Quelques soient les repères chronologiques choisis pour les estimer, et compte-tenu que le taux de sédimentation n'est certainement pas constant, ces âges Allerød sont compatibles avec ceux du complexe CF1a/CF1b et de la retombée de la Moutade émis par le Puy de la Nugère (Juvigné *et al.*, 1995a ; Vivent & Vernet, 2001 ; Miallier *et al.*, 2004b ; Boivin *et al.*, 2004). Cette éruption très complexe a débuté par une phase phréotomagmatique très puissante dont les produits se sont largement dispersés vers l'est.

4.3 - LES TÉPHRAS DRYAS RÉCENT

Dans les deux sites des Vosges, un petit pic de susceptibilité magnétique localisé au début du Dryas récent correspond à la présence d'échantons de verre

Echantillon	Laacher See Tephra					Vedde Ash	
	Etang du Lautrey	Lac d'Onoz	Gerzensee	Marais de la Maxe	Lac de Sewen	Marais de la Maxe	Lac de Sewen
SiO ₂	58,32 (0,69)	58,7 (1,17)	58,35 (0,88)	57,52 (0,83)	58,57 (1,07)	68,95 (1,41)	70,09 (1,32)
TiO ₂	0,15 (0,1)	0,53 (0,29)	0,51 (0,2)	0,32 (0,17)	0,52 (0,04)	0,28 (0,13)	0,15 (0,06)
Al ₂ O ₃	19,68 (0,42)	19,85 (0,46)	19,78 (0,53)	19,81 (0,60)	19,74 (0,52)	13,19 (0,32)	13,36 (0,17)
FeO	2,22 (0,12)	2,08 (0,29)	2,3 (0,21)	2,06 (0,14)	2,12 (0,13)	3,74 (0,23)	3,72 (0,20)
MnO	0,17 (0,05)	0,17 (0,09)	0,19 (0,12)	0,31 (0,13)	0,13 (0,08)	0,12 (0,09)	0,16 (0,10)
MgO	0,27 (0,05)	0,22 (0,06)	0,27 (0,08)	0,26 (0,03)	0,26 (0,04)	0,20 (0,06)	0,21 (0,04)
CaO	1,47 (0,3)	1,38 (0,28)	1,74 (0,37)	1,02 (0,47)	1,53 (0,11)	1,29 (0,06)	1,26 (0,09)
Na ₂ O	6,68 (0,46)	6,68 (0,77)	6,62 (0,51)	7,35 (0,81)	6,53 (0,86)	4,55 (0,38)	4,40 (0,23)
K ₂ O	7,56 (0,24)	7,13 (0,6)	7,12 (0,73)	6,35 (0,59)	6,96 (0,45)	3,40 (0,12)	3,40 (0,15)
P ₂ O ₅	0,05 (0,02)	0,06 (0,04)	0,08 (0,03)	n.a.	n.a.	0,03 (0,02)	0,06 (0,03)
Cl	0,30 (0,03)	0,28 (0,03)	0,29 (0,08)	0,37 (0,10)	0,22 (0,02)	0,17 (0,04)	0,16 (0,05)
F	-	0,13 (0,12)	0,16 (0,15)	n.a.	n.a.	0,14 (0,11)	0,18 (0,08)
Total	96,87 (1,36)	97,21 (1,23)	97,41 (1,3)	96,08 (1,87)	97,05 (2,21)	96,05 (1,69)	97,07 (1,75)
Nb d'échantillons analysés	11	7	16	7	10	21	7

Tab. 2 : Composition chimique (en % de poids d'oxydes d'éléments majeurs) des verres volcaniques du Laacher See Tephra et du Vedde Ash observés dans les cinq sites présentés dans cette étude. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.

Tab. 2: Major oxides concentrations of glass shards from the Laacher See Tephra and the Vedde Ash observed in Lakes Onoz, Lautrey, Gerzensee and Sewen, and the mire Maxe. Standard deviation in brackets.

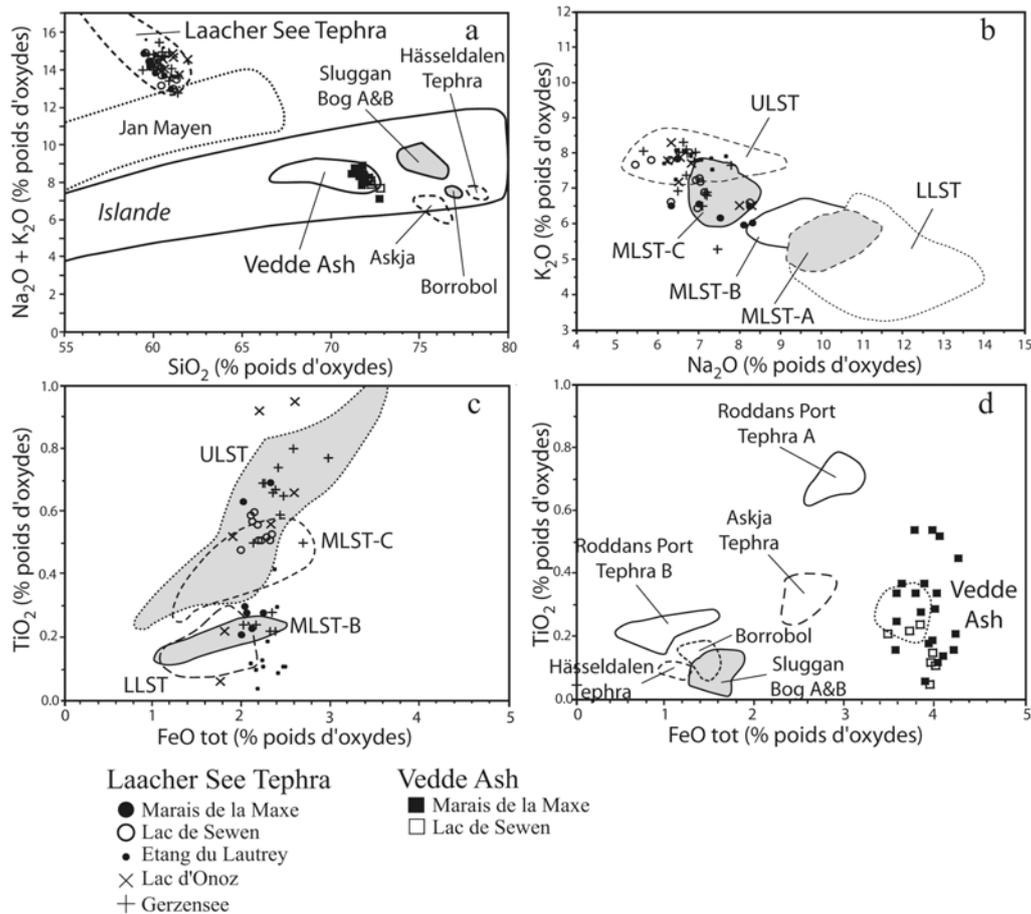


Fig. 10 : Représentation de la composition chimique des verres volcaniques (analyses normalisées à 100%). (a) diagramme Na₂O+K₂O - SiO₂ présentant nos données comparées à des données de la littérature ; (b) diagramme K₂O - Na₂O et (c) diagramme TiO₂ - FeOtot présentant nos données concernant le Laacher See Tephra comparées à des données de la littérature ; (d) diagramme TiO₂ - FeOtot présentant nos données concernant le Vedde Ash comparées à des données de la littérature. Les données de la littérature utilisées proviennent des compilations de Davies *et al.* (2004) et Turney *et al.* (2006).

Fig. 10: Chemical composition of the volcanic glass (data normalized to 100%). (a) binary plot of Na₂O+K₂O - SiO₂ of our data with comparison to data from the literature; (b) binary plot of K₂O - Na₂O and (c) binary plot of TiO₂ - FeOtot of our data from the Laacher See Tephra; (d) binary plot of TiO₂ - FeOtot of our data from the Vedde Ash compared to those of the literature. Geochemical envelopes are compiled from Davies *et al.* (2004) and Turney *et al.* (2006).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
Étang du Lautrey											
LT2											
Verre (n=4)	51,61 (4,58)	0,23 (0,11)	20,70 (0,41)	1,70 (0,81)	0,06 (0,07)	0,48 (0,28)	6,78 (0,56)	5,25 (0,39)	1,23 (0,64)	0,23 (0,17)	88,26 (7,14)
Plagioclase (n=7)	56,48 (0,14)	0,24 (0,05)	26,04 (0,5)	0,83 (0,07)	0,02 (0,01)	0,12 (0,02)	9,51 (0,36)	5,5 (0,1)	0,59 (0,01)	0,08 (0,02)	99,41 (1)
LT3											
Verre (n=3)	58,59 (0,61)	0,00	17,66 (0,09)	0,02 (0,01)	0,00	0,01 (0,01)	0,96 (0,1)	9,73 (0,24)	0,09 (0,03)	0,03 (0,01)	87,09 (1,06)
Plagioclase (n=4)	53,64 (0,14)	0,06 (0,08)	28,51 (0,26)	0,57 (0,01)	0,02 (0,05)	0,09 (0,01)	11,29 (0,12)	4,84 (0,07)	0,39 (0,05)	0,04 (0,02)	99,43 (0,49)
Téphra La Nugère											
Etlicher <i>et al.</i> , 1987	54,99	2,29	16,04	7	0,23	2,44	5,47	4,45	3,8	-	97,24
Mauray <i>et al.</i> , 1980	57,1	1,12	17,89	6,83	0,19	1,94	4,53	5,42	3,4	0,31	98,73

Tab. 3 : Composition chimique des verres volcaniques et de certains phénocristaux caractéristiques des deux téphras Allerød anté-LST observés dans le site de l'étang du Lautrey. Le nombre de grains et d'échardes analysés (n) et l'écart-type sont indiqués entre parenthèses.

Tab. 3: Major oxides concentrations of glass shards and some phenocrysts from the two tephtras that are Allerød and anterior to LST and supposed to come from the Puy de la Nugère. Number of shards and phenocrysts analyzed (n) and standard deviation in brackets.

volcanique non altéré présentant souvent des formes dites en ailes de papillon (« butterfly wings ») (fig. 9C) accompagnés de feldspaths aux bords très anguleux. Ces verres ont une composition rhyolitique (tab. 2), identique à celle du Vedde Ash (fig. 10a et 10e), provenant du volcan Katla (Islande), et très distincte de celles des autres téphras rhyolitiques déposés durant le Tardiglaciaire et l'Holocène. Cette concordance avec le Vedde Ash est compatible avec l'âge Dryas récent de la palynozone pendant laquelle ce téphra s'est déposé et les âges radiocarbone obtenus sur des macrorestes prélevés dans la carotte du site du Lac de Sewen (fig. 6). Lors de la recherche systématique de cendres volcaniques dans les dépôts Dryas récent du sondage de l'étang du Lautrey présenté ici (fig. 3) et d'un autre sondage réalisé 70 mètres plus à l'ouest de celui-ci (sondage 105), des échardes volcaniques ont été observées. Leurs caractéristiques morphologiques sont identiques à celles décrites dans les deux sites vosgiens, mais leur petite taille (< 40 µm) et leur faible nombre (environ trente par centimètre cube de sédiment) ne permet pas, pour l'instant, leur analyse chimique. Cependant, compte-tenu de leur position stratigraphique, nous pouvons supposer qu'il s'agit là aussi du Vedde Ash. Cette hypothèse est confortée par l'identification récente du Vedde Ash dans les argiles varvées du Dryas récent du Soppensee situé environ 300 km plus à l'Est, sur le Plateau suisse (canton de Lucerne) (Blockley *et al.*, in press).

5 - DISCUSSION

La situation géographique des Vosges et du Jura, centrale par rapport à trois des principaux centres éruptifs actifs pendant le Tardiglaciaire, place ces deux massifs à l'intersection des nuages de dispersion du Laacher See Tephra, du Vedde Ash et de téphras provenant de la Chaîne des Puys (fig. 11).

L'éruption du Laacher See a généré trois nuages de dispersion majeurs, eux-mêmes constitués de plusieurs phases éruptives (Lower-LST, Middle-LST-A, -B, -C (1, 2, 3) et Upper-LST). Depuis 1970, le LST a été identifié dans des séquences sédimentaires de l'est

(Juvigné, 1977 ; Schloss, 1979 ; Juvigné, 1980 ; van den Bogaard & Schmincke, 1985 ; Bossuet *et al.*, 1997) et du sud-est (Martini, 1970 ; Wegmüller & Welten, 1973 ; van den Bogaard & Schmincke, 1985) de la France. Sa présence dans d'autres sites des Vosges et jusque dans le Jura permet de compléter l'extension de la limite ouest de son nuage de dispersion méridional proposée par van den Bogaard & Schmincke (1985). L'identification des phases les plus récentes du LST (MLST-B et -C et ULST) dans ces sites apporte des données nouvelles quant à la dispersion des différentes phases éruptives formant le nuage méridional puisque les données de van den Bogaard & Schmincke (1985) ne faisait apparaître que l'ULST dans sa partie occidentale alors que sa partie orientale comprenait les phases MLST-A et -C2. L'identification de plus d'une phase dans la partie occidentale de ce nuage montre que la distribution des phases éruptives est plus complexe que ce qui a été décrit jusqu'à maintenant. La même complexité a récemment été prouvée par Turney *et al.* (2006) pour le nuage de dispersion septentrional.

La figure 10 b et c montre que le lac de Sewen ne semble pas avoir enregistré le passage de la phase MLST-B qui est par ailleurs présente dans les sédiments du marais de la Maxe, mais aussi plus au sud dans les lacs d'Onoz et de Gerzensee, et l'étang du Lautrey. Tous ces sites étant situés selon un axe nord-sud par rapport au massif de l'Eifel, on peut en conclure que l'absence d'échardes caractéristiques de la phase MLST-B dans le lac Sewen est certainement un artéfact dû au faible nombre d'analyses réalisées sur ce site (n<10).

Jusqu'à présent, le nuage de dispersion du Vedde Ash était limité à l'Irlande, l'Ecosse, aux Pays-Bas, à la Norvège, au Danemark, au sud de la Suède, à l'Ouest de la Russie et aux enregistrements marins nord-atlantiques (parmi d'autres : Wastegård *et al.*, 1998 ; Wastegård *et al.*, 2000 a et b ; Wastegård, 2002 ; Davies *et al.*, 2005 ; Turney *et al.*, 2006). Très récemment, Blockley *et al.* (in press) l'ont identifiée sous la forme d'un cryptotéphra dans les argiles varvées des lacs Soppensee (Suisse) et Rotmeer (Sud de l'Allemagne). L'identification du Vedde Ash dans deux sites du massif des Vosges, et probablement dans un site du massif

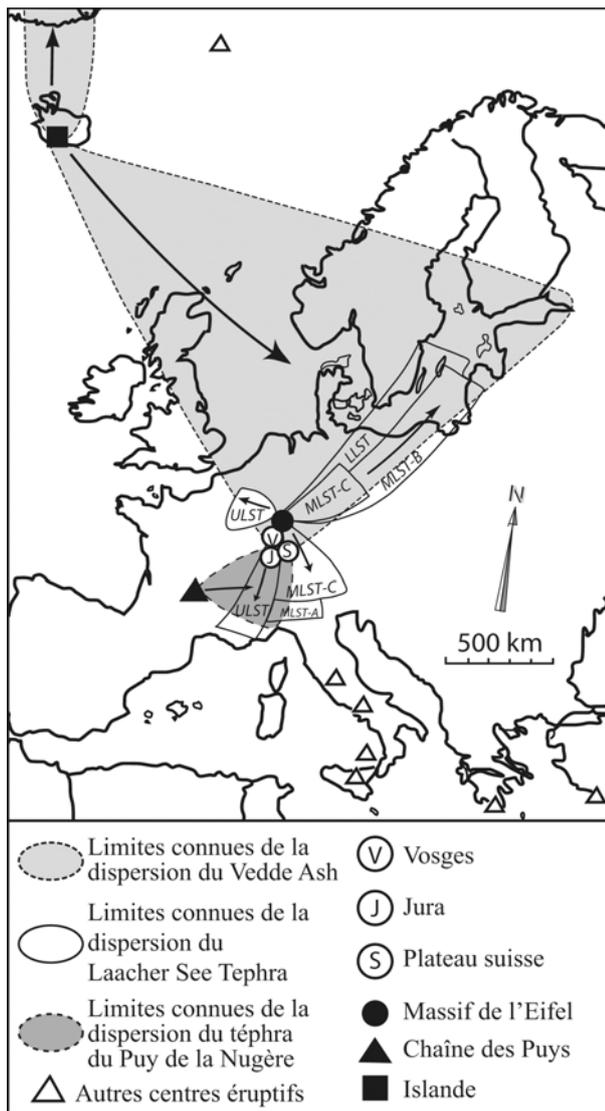


Fig. 11 : Représentation des limites connues des nuages de dispersion du Laacher See Tephra, du Vedde Ash et des téphras attribués au Puy de la Nugère. LLST : première phase d'éruption (Lower LST), MLST-A, -B, -C : deuxième phase d'éruption (Middle LST) avec A, B et C correspondant aux trois phases du MLST, ULST : troisième phase d'éruption (Upper LST). Les enveloppes des panaches sont dessinées à partir des données de Martini (1970), van den Bogaard & Schmincke (1985), Bossuet *et al.* (1997), Wastegård *et al.* (2000 a et b), Turney *et al.* (2004, 2006), Vannièrre *et al.* (2004), Davies *et al.* (2005), Pilcher *et al.* (1995) et notre étude.

*Fig. 11: Distribution of the Vedde Ash, the Laacher See Tephra and the tephra of Puy de la Nugère. LLST: first phase of the eruption (Lower LST), MLST-A, -B, -C: second phase of the eruption (Middle LST) with A, B et C referred to as the three phases of the MLST, ULST: third phase of the eruption (Upper LST). The distribution of the different tephra is based on works by Martini (1970), van den Bogaard & Schmincke (1985), Bossuet *et al.* (1997), Wastegård *et al.* (2000), Turney *et al.* (2004, 2006), Vannièrre *et al.* (2004), Davies *et al.* (2005), Pilcher *et al.* (1995) and our study.*

jurassien, est actuellement la plus méridio-occidentale. Ces occurrences dans des régions très voisines montrent que la dispersion de ce téphra est bien plus étendue que ce qui a été suggéré jusqu'à présent (Davies *et al.*, 2005 ; Turney *et al.*, 2006). Sa détection dans les Vosges suggère que le Vedde Ash a vraisemblablement aussi été enregistré dans des séquences

sédimentaires des régions voisines plus occidentales (Lorraine, Morvan,...). Cette probabilité ouvre de nouvelles perspectives pour les études paléoenvironnementales régionales qui y sont menées.

Les synthèses de Davies *et al.* (2005), Turney *et al.* (2006) et Wastegård (2005), et les résultats de Blockley *et al.* (in press) mettent en évidence une zonation chimique interne au nuage de dispersion sud-est de ce téphra : les composants basaltiques et rhyolitiques sont trouvés ensemble dans des séquences sédimentaires terrestres jusque dans le nord de l'Ecosse et dans le sud-ouest de la Norvège (Mangerud *et al.*, 1984 ; Grønvoold *et al.*, 1995 ; Davies *et al.*, 2001). Dans ces enregistrements, la proportion entre les échantillons rhyolitiques et basaltiques varie. Plus au sud, en Irlande, dans le sud de l'Ecosse, aux Pays-Bas, en Allemagne, en Suisse, dans le sud de la Suède et l'ouest de la Russie, les occurrences du Vedde Ash ne contiennent que des échantillons de verre de composition rhyolitique (Wastegård *et al.*, 2000a ; Wastegård *et al.*, 2000b ; Davies *et al.*, 2005 ; Turney *et al.*, 2006 ; Blockley *et al.*, in press). Les dépôts observés dans les sites du lac de Sewen et du Marais de la Maxe confirment cette zonation. Pour l'expliquer, Davies *et al.* (2005) mettent en avant les deux principales méthodes de séparation employées (séparation magnétique ou séparation par densité). Selon eux, la séparation par densité ne permet pas d'isoler les échantillons de verre basaltique des autres constituants minéraux du dépôt. Mais cette explication ne peut être retenue dans certains sites où seul le terme rhyolitique a été observé suite à l'utilisation d'une séparation magnétique. Dans nos deux sites vosgiens, nous avons aussi analysé les refus de séparation obtenus. Ils ne contiennent aucune échantillon de verre basaltique. Il semblerait donc que la zonation chimique observée au sein du nuage de dispersion sud-est du Vedde Ash soit dû à un autre phénomène. Les particules de verre volcanique ont pu être triées par densité durant leur transport éolien, les échantillons basaltiques étant plus denses. Mais on peut aussi émettre l'hypothèse selon laquelle le Vedde Ash correspondrait à deux éruptions volcaniques, l'une rhyolitique, l'autre basaltique, si rapprochées dans le temps qu'elles ne sont pas stratigraphiquement distinguables dans les enregistrements étudiés jusqu'à présent. La puissance plus importante de l'éruption à caractère rhyolitique expliquerait sa répartition géographique plus vaste. Dans la littérature, la composition bimodale du Vedde Ash est expliquée comme le résultat soit de l'éruption synchrone de deux centres volcaniques islandais, le Katla et le Öräfajökull (Norðdahl & Haflíðason, 1992), soit d'au moins deux explosions de deux chambres magmatiques différentes appartenant au complexe volcanique Katla (Mangerud *et al.*, 1984 ; Lacasse *et al.*, 1995). Cette dernière proposition est tout à fait compatible avec la co-existence de deux nuages de cendres de compositions chimiques distinctes. Compte-tenu des faibles taux de sédimentation observés et du pas d'échantillonnage utilisés

(généralement le centimètre, plus rarement le demi-centimètre) dans les enregistrements lacustres où le Vedde Ash bimodal a été identifié, ces deux nuages ne forment finalement qu'un dépôt unique.

L'âge estimé des téphras Allerød anté-LST présents dans les remplissages du Jura et du Plateau suisse permet de les considérer comme des produits générés par l'activité volcanique du Puy de la Nugère. Cependant, le verre volcanique, altéré, ne peut être utilisé pour confirmer ou non cette parenté (tab. 3). Dans le cortège de phénocristaux, beaucoup de minéraux semblent aussi altérés. Parmi eux, l'olivine magnésienne, le spinelle, l'albite, l'orthose, le mica blanc et le sphène, bien que présents dans ces niveaux de téphras, ne proviennent pas de l'évolution du magma dans la chambre magmatique et ne permettent donc pas de caractériser le ou les volcans sources. L'origine de ces minéraux pose problème. Ils pourraient provenir du socle de la Chaîne des Puys pulvérisé lors de la phase phréatomagmatique initiale de l'éruption du Puy de la Nugère et/ou d'un autre socle, par apport éolien. Cette dernière hypothèse pourrait être confortée par la présence, sur le Plateau suisse, de dunes et limons éoliens d'origines jurassienne et alpine, d'âge tardiglaciaire, et de la présence de particules éoliennes dans des dépôts tourbeux et lacustres du même âge. Mais les minéraux « non volcaniques » présents dans les téphras LT2 et LT3 sont différents de ceux caractérisant les particules éoliennes d'origine alpine dans lesquelles on observe de l'amphibole par exemple. L'hypothèse d'une origine liée au socle pulvérisé lors de la phase phréatomagmatique semble donc plus vraisemblable, d'autant plus que des éléments du socle granitique sont observés dans les premiers dépôts de l'éruption du Puy de la Nugère (Boivin *et al.*, 2004).

Les phénocristaux caractéristiques des téphras attribués au Puy de la Nugère sont un clinopyroxène, une amphibole brune et des plagioclases (Boivin *et al.*, 2004). Le clinopyroxène, peu présent dans les téphras anté-LST de l'étang du Lautrey, montre une composition chimique certainement modifiée suite à sa probable altération ; il est lui aussi inutilisable. L'amphibole brune est absente de nos dépôts. Il s'agit peut-être de la conséquence d'une altération poussée, d'un effet local de sédimentation ou, plus vraisemblablement, d'un tri par densité lors du transport puisque sa densité est nettement plus importante que celle des plagioclases (2,97-3,57 pour l'olivine ; 2,6-2,7 pour les plagioclases). En revanche, les plagioclases sont relativement abondants et intacts. Il s'agit de labrador (An_{52-58}) dans le téphra le plus vieux (LT3) et de labrador et andésine (An_{43-52}) dans le téphra LT2. Ces compositions sont compatibles avec celles des plagioclases présents dans les laves trachy-basaltiques et trachy-andésitiques de la Chaîne des Puys (Boivin *et al.*, 2004), et dans les téphras produits par le Puy de la Nugère dont le complexe téphrique CF1a/CF1b et le Téphra de Ravel (13180-13350 ans) qui est observé jusque dans le Haut Forez et le fossé de Limagne (Etlicher *et al.*, 1987 ; Juvigné *et al.*, 1992). Le téphra LT3

correspondrait à une lave trachy-basaltique et le LT2 à une lave plus évoluée, trachy-andésitique. Dans la Chaîne des Puys, seul le Puy de la Nugère a émis des laves correspondant à tous les stades de mélange de deux magmas et dans lesquelles la nature du plagioclase évolue (Gourgaud & Camus, 1984). Nos données semblent donc confirmer que la phase phréatomagmatique de l'éruption du Puy de la Nugère est à l'origine des produits qui constituent les téphras LT2 et LT3. Les produits de cette éruption se seraient donc dispersés au-delà des Monts du Forez jusque dans le Jura où ils ne s'expriment plus que sous forme de cryptotéphras.

La présence de téphras provenant de la Chaîne des Puys a déjà été suspectée dans des enregistrements alpins tardiglaciaires et holocènes (Martini, 1970), mais leur caractérisation reposait alors sur des cortèges de minéraux lourds. En revanche, dans la séquence sédimentaire tardiglaciaire du Lac d'Annecy, Nomade (2005) a observé un téphra montrant une composition trachytique (J. Nomade & A. Brauer, comm. Perso.). Le modèle d'âge présenté pour ce site permet de proposer un âge de 13 394-13 534 ans qui est compatible avec l'activité volcanique allerød du Puy de la Nugère. Le lobe de dispersion est donc beaucoup plus vaste que ne le laissent supposer les téphras, visibles à l'œil nu, décrites en Limagne et dans les Monts du Forez. Cela n'est guère étonnant puisque le Puy de la Nugère est le volcan de la Chaîne des Puys qui a produit le plus gros volume de cendres (Boivin *et al.*, 2004) et que les téphras observés dans le Jura sont des cryptotéphras. Cette dernière caractéristique rend l'enregistrement de ces téphras très capricieux, soumis à des effets de sédimentation locale qui rendent leur enregistrement très hétérogène d'un site à un autre et au sein d'un même site.

6 - CONCLUSION

La détection et la caractérisation des cryptotéphras permet d'avoir accès à des enregistrements très distaux qui complètent efficacement le cadre téphrochronologique de l'Europe de l'Ouest. Ainsi, les occurrences communes du Laacher See Tephra et du Vedde Ash dans le massif vosgien, et sans doute le massif jurassien, et celles du LST et de téphras allerød provenant du Puy de la Nugère dans le Jura et sur le Plateau suisse, offrent donc un « pont » chronologique supplémentaire entre les séquences sédimentaires nord- et centre-européennes et celles situées plus à l'ouest. Elles soulignent l'importance du LST et du Vedde Ash pour les études paléoenvironnementales dans cette partie de l'Europe puisqu'elles encadrent la limite Allerød - Dryas récent et permettent, pour cet intervalle de temps, de pallier l'absence de données radiochronologiques, comme dans le cas du site du Marais de la Maxe, par exemple. En revanche, aucun téphra originaire des provinces volcaniques italiennes n'a été observé dans ces régions.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tout particulièrement Michel FIALIN et Frédéric COUFIGNAL du Centre de microanalyse CAMPARIS (Université P. et M. Curie, Paris) pour leur disponibilité et leur gentillesse, ainsi que Jérôme Boutet et Romain Zeiller, étudiants de l'Université de Franche-Comté. Les résultats présentés ici ont été réalisés grâce à des financements de l'Université de Franche-Comté (BQR et PPF) et du CNRS (Eclipse). Nos remerciements vont aussi à J.-F. Pastre et à un relecteur anonyme pour leurs remarques très constructives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN J.R.M., BRANDT U., BRAUER A., HUBBERTEN H.W., HUNTLEY B., KELLER J., KRAML M., MACKENSEN A., MINGRAM J., NEGENDANK J.F.W., NOWACZYK N.R., OBERHÄNSLI H., WATTS W.A., WULF S., & ZOLITSCHKA B., 1999 - Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature*, **400**, 740-743.
- BÉGEOT C., RICHARD H., RUFFALDI P., & BOSSUET G., 2000 - Enregistrement pollinique des changements climatiques de l'Interstade Bølling-Allerød dans l'est de la France. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **171** (1), 51-58.
- BÉGEOT C., 2000 - *Histoire de la végétation et du climat au cours du Tardiglaciaire et du début de l'Holocène sur le massif jurassien central à partir de l'analyse pollinique et des macrorestes végétaux*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 199 p.
- BIRKS H., GULLIKSEN S., HAFLIDASON H., & MANGERUD J., 1996 - New Radiocarbon Dates for the Vedde Ash and the Sakunarvatn Ash from Western Norway. *Quaternary research*, **45**, 119-127.
- BLOCKLEY S.P.E., PYNE-O'DONNELL S.D.F., LOWE J.J., MATTHEWS I.P., STONE A., POLLARD A.M., TURNEY C.S.M., & MOLYNEUX E.G., 2004 - A new and less destructive laboratory procedure for the physical separation of distal glass tephra shards from sediments. *Quaternary Science Reviews*, **24**, 1952-1960.
- BLOCKLEY S.P.E., LANE C.S., LOTTER A.F., & POLLARD A.M., in press - Evidence for the presence of the Vedde Ash in Central Europe. *Quaternary Science Reviews*.
- BOIVIN P., BESSON J.-C., BRIOT D., CAMUS G., GOËR de HERVE de A., GOURGAUD A., LABAZUY P., LAROUZIÈRE F.-D. De, LIVET M., MERGOIL J., MIALLIER D., MOREL J.-M., VERNET G., & VINCENT P.M. (avec la participation de S. Jannot et J.-P. Raynal), 2004 - *Volcanologie de la Chaîne des Puys (Massif Central français)*, 4ème édition. Edité par le Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, Château de Montlosier, Randonnée, 63 970 Aydat, 180 p.
- BOSSUET G., CAMERLYNCK C., DABAS M., & MARTIN M., 2000 - Contribution des méthodes géophysiques (électrique, électromagnétique, radar-sol) à l'étude des dépressions lacustres. L'exemple du Lautrey (Jura, France). *Eclogae Geologicae Helveticae*, **93**, 147-156.
- BOSSUET G., RICHARD H., MAGNY M., & ROSSY M., 1997 - Nouvelle occurrence du Laacher See Tephra dans le Jura central. Etang du Lautrey (France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **325**, 43-48.
- BRAUER A., ENDRES C., & NEGENDANK J.F.W., 1999 - Late-glacial calendar year chronology based on annually laminated sediments from Lake Meerfelder Maar, Germany. *Quaternary International*, **61**, 17-25.
- DAVIES S., BRANCH N., LOWE J., & TURNEY C., 2002 - Towards a European tephrochronological framework for Termination 1 and the Early Holocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 767-802.
- DAVIES S.M., HOEK W.Z., BOHNCKE S.J.P., LOWE J.J., PYNE O'DONNELL S., & TURNEY C.S.M., 2005 - Detection of Lateglacial distal tephra layers in The Netherlands. *Boreas*, **34**, 123-135.
- DAVIES S.M., WASTEGÅRD S., & WOHLFARTH B., 2003 - Extending the limits of the Borrobol Tephra to Scandinavia and detection of the new early Holocene tephras. *Quaternary Research*, **59**, 345-352.
- DAVIES S.M., TURNEY C.S.M., & LOWE J., 2001 - Identification and significance of a visible, basalt-rich Vedde Ash layer in a Late-glacial sequence on the Isle of Skye, Inner Hebrides, Scotland. *Journal of Quaternary Science*, **16**, 99-104.
- DAVIES S.M., WOHLFARTH B., WASTEGÅRD S., ANDERSSON M., BLOCKLEY S., & POSSNERT G., 2004 - Were there two Borrobol Tephras during the early Lateglacial period: implications for tephrochronology? *Quaternary Science Reviews*, **23**, 581-589.
- DELIBRIAS G., DI PAOLA G.M., ROSI M., & SANTACROCE R., 1979 - La storia eruttiva del complesso vulcanico Somma-Vesuvio ricostruita dalle successioni piroclastiche del Monte Somma. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, **35**, 411-438.
- DUGMORE A.J., LARSEN G., & NEWTON A.J., 1995 - Seven tephra isochrones in Scotland. *The Holocene*, **5**, 257-266.
- EICHER U., & SIEGENTHALER U., 1976 - Palynological and oxygen isotope investigation on Late Glacial sediment cores from Swiss lakes. *Boreas*, **5**, 109-117.
- EICHER U., 1980 - Pollen- und Sauerstoffisotopenanalysen an spätglazialen Profilen von Gerzensee, Faulenseemoos und Regenmoos ob Boltigen. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern*, **37**, 65-80.
- ETLICHER B., JANSSEN C.R., JUVIGNÉ E., & LEEUWEN J.F.N. v., 1987 - Le Haut Forez (Massif Central, France) après le Pléistocène würmien : environnement et téphra du volcan de la Nugère. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **4**, 229-239.
- FIRBAS F., GRÜNIG G., WEISCHEDEL I., & WORZEL G., 1948 - Beiträge zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte des Vogesen. In R. Pilger (ed.), *Bibliotheca Botanica, Original-Abhandlungen aus dem Gesamtgebiet der Botanik*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, **121**, 37-43.
- FRIEDRICH M., KROMER B., SPURK M., HOFMAN J., & KAISER K.F., 1999 - Paleo-environment and radiocarbon calibration as derived from Lateglacial/Early Holocene tree-ring chronologies. *Quaternary International*, **61**, 27-39.
- FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., HOFMAN J., SPURK M., KAISER K.F., ORCEL C., & KÜPPERS M., 2004 - The 12,460-year Hohenheim Oak and Pine tree-ring chronology from Central Europe - a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon*, **46**, 3, v-1334, 1111-1122.
- GOURGAUD A., & CAMUS G., 1984 - Magma mixing at La Nugère Volcano (Chaîne des Puys, Massif Central, France): role in the trachy-andesite genesis. *Bulletin Volcanologique*, **47** (4), 781-805.
- GRØNVOLD K., OSKARSSON N., JOHNSEN S.J., CLAUSEN H.B., HAMMER C.U., BOND G., & BARDE E., 1995 - Ash layers from Iceland in the Greenland GRIP ice core correlated with oceanic and land sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **135**, 149-155.
- GUILLAUME S., & GUILLAUME A., 1962 - Carte et notice géologiques "Champagnole". Editions du BRGM.
- HAJDAS I., IVY-OCHS S.D., BONANI G., LOTTER A.F., ZOLITSCHKA B., & SCHLÜCHTER C., 1995 - Radiocarbon age of the Laacher See Tephra: 11,230 ± 40 BP. *Radiocarbon*, **37** (2), 149-154.
- JUVIGNÉ E., 1977 - La zone de dispersion des poussières émises par une des dernières éruptions du volcan du Laacher See (Eifel). *Zeitschrift für Geomorphologie*, **21**, 323-342.
- JUVIGNÉ E., 1980 - Révision de l'âge des volcans de l'Eifel occidentale. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **24**, 345-355.
- JUVIGNÉ E., 1987 - Deux retombées volcaniques tardiglaciaires dans le Cézallier (Massif central, France). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **4**, 241-249.
- JUVIGNÉ E., 1991 - Distribution de vastes retombées volcaniques originaires de l'Eifel et du Massif Central aux temps post-glaciaires dans le NE de la France et les régions voisines. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **312** (II), 415-420.

- JUVIGNÉ E., BASTIN B., DELIBRIAS G., EVIN J., GEWELT M., GILOT E., & STREEL M., 1995a - A comprehensive pollen end tephra-based chronostratigraphic model for the late glacial and Holocene period in the french Massif Central. *Quaternary International*, 113-120.
- JUVIGNÉ E., KOZARSKI S., & NOWACZYK B., 1995b - The occurrence of Laacher See tephra in Pomerania, NW Poland. *Boreas*, 24, 225-231.
- JUVIGNÉ E., KROONENBERG S., VELDKAMP A., EL ARABI A., & VERNET G., 1992 - Widespread Allerød and Boreal trachyandesitic to trachytic tephra layers as stratigraphical markers in the Massif Central, France. *Quaternaire*, 3, 137-146.
- KERRIEN Y., DREYFUSS M., & CAMPY M., 1982 - Carte et notice géologiques "Orgelet". Editions du BRGM.
- KROMER B., FRIEDRICH M., HUGHEN K.A., KAISER K.F. REMMELE S., SCHAUB M., & TALAMO S., 2004 - Late Glacial ¹⁴C ages from a floating, 1382-ring Pine chronology. *Radiocarbon*, 46 (3), v-1334, 1203-1209.
- LACASSE C., SIGURDSSON H., JÓHANNESSON H., PATERNE M., & CAREY S., 1995 - Source of ash zone 1 in the North Atlantic. *Bulletin of Volcanology*, 57, 18-32.
- LITT T., BRAUER A., GOSLAR T., MERKT J., BALAGA K., MÜLLER H., RALSKA-JASIEWICZOWA M., STEBICH M., & NEGENDANK J.F.W., 2001 - Correlation and synchronisation of Lateglacial continental sequences in northern central Europe based on annually-laminated lacustrine sediments. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1233-1249.
- LOTTER A.F., BIRKS H.J.B., EICHER U., HOFMAN W., SCHWANDER J., & WICK L., 2000 - Younger Dryas and Allerød summer temperatures at Gerzensee (Switzerland) inferred from fossil pollen and cladoceran assemblages. *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology*, 159, 349-362.
- LOWE J., HOEK W.Z., & INTIMATE, 2001 - Inter-regional correlation of palaeoclimatic records for the Last Glacial/Interglacial Transition: a protocol for improved precision recommended by the INTIMATE project group. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1175-1187.
- LOWE J., & HUNT J.B., 2001 - A summary of terminology used in tephra-related studies. In E. Juvigné & J.-P. Raynal (eds), *Tephra: Chronology, Archaeology*. Les Dossiers de l'Archéo-Logis, CRDP Clermont-Ferrand, 1, 17-22.
- MAGNY M., & RUFFALDI P., 1994 - A palaeohydrological record of Younger Dryas from lake Onoz in Jura, France. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 319, série II, 459-466.
- MAGNY M., 2001 - Palaeohydrological changes as reflected by lake-level fluctuations in the Swiss Plateau, the Jura Mountains and the northern French Pre-Alps during the Last-Glacial-Holocene transition: a regional synthesis. *Global and Planetary Change*, 30, 85-101.
- MAGNY M., AALBERSBERG G., BÉGEOT C., RUFFALDI P., BOSSUET G., DISNAR J.R., HEIRI O., LAGGOUNDEFARGE F., MAZIER F., MILLET L., PEYRON O., VANNIÈRE B., & WALTER-SIMONNET A.V., 2006 - Environmental and climatic changes in the Jura mountains (eastern France) during the Lateglacial-Holocene transition: a multi-proxy record from Lake Lautrey. *Quaternary Science Reviews*, 25, 414-445.
- MANGERUD J., LIE S.E., FURNES H., KRISTIENSEN I., & LOMO L., 1984 - A Younger Dryas ash bed in western Norway, and its possible correlations with tephra in cores from the Norwegian Sea and the North Atlantic. *Quaternary Research*, 21, 85-104.
- MARTINI R., 1970 - Recherche des retombées volcaniques quaternaires dans le sud-est de la France et la Suisse occidentale. *Archives des Sciences*, 23, 641-674.
- MAURY R.C., BROUSSE R., VILLEMANT B., JORON J.L., JAFFREZIC H., & TREUIL M., 1980 - Cristallisation fractionnée d'un magma basaltique alcalin : la série de la Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Bulletin de Minéralogie*, 103, 250-266.
- MENILLET F., DURAND M., MAÏAUX C., & LOUGNON, J., 1978 - Carte et notice géologiques « Cirey-sur-Vezouze », Editions du BRGM.
- MIALLIER D., MICHON L., EVIN J., PILLEYRE T., SANZELLE S., & VERNET G., 2004 a - Volcans de la Chaîne des Puys (Massif central, France) : point sur la chronologie Vasset-Kilian-Pariou-Chopine. *Comptes-Rendus Géoscience*, 336, 1345-1353.
- MIALLIER D., SANZELLE S., PILLEYRE T., VERNET G., BRUGIERE S., & DANHARA T., 2004 b - Nouvelles données sur le téphra de Sarliève et le téphra CF7, marqueurs chrono-stratigraphiques de Grande Limagne (Massif central, France). *Comptes-Rendus Géoscience*, 336, 1-8.
- MOSCARIELLO A., & COSTA F., 1997 - The upper Laacher See Tephra in lake Geneva sediments : paleoenvironmental and paleoclimatological implications. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 77, 175-185.
- NOMADE J., 2005 - *Chronologie et sédimentologie du remplissage du lac d'Annecy depuis le Tardiglaciaire : implications paléoclimatologiques et paléohydrologiques*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- NORDDAHL H., & HAFLIDASON H., 1992 - The Skógar Tephra, a Younger Dryas marker in North Iceland. *Boreas*, 21, 23-41.
- PECCERILLO A., 2005 - *Plio-Quaternary volcanism in Italy. Petrology, geochemistry, geodynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 365 p.
- PILCHER J.R., HALL V.A., & MACCORMAC F.G., 1995 - Dates of Holocene Icelandic volcanic eruptions from tephra layers in Irish peats. *The Holocene*, 5, 103-110.
- REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BERTRAND C., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G., CUTLER K.B., DAMON P.E., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GUILDERSON T.P., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC F.G., MANNING S., BRONK RAMSEY C., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J.R., STUIVER M., TALAMO S., TAYLOR F.W., van der PLICHT J., & WEYHENMEYER C.E., 2004 - IntCal04-terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46 (3), 1029-1058.
- ROLANDI G., PETROSINO P., & MC GEEHIN J., 1998 - The interplinian activity at Somma-Vesuvius in the last 3500 years. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 82, 19-52.
- SCHLOSS S., 1979 - Pollenanalytische und stratigraphische Untersuchung im Sewensee: ein Beitrag zur spät- und postglazialen Vegetationsgeschichte der Südvogesen. *Dissertationes Botanicae*, 52, 138 p.
- SCHMIDT R., BOGAARD C.V.D., MERKT J., & MULLER J.M., 2002 - A new Lateglacial chronostratigraphic tephra marker for the south-eastern Alps: The Neapolitan Yellow Tuff (NYT) in Längsee (Austria) in the context of a regional biostratigraphy and palaeoclimate. *Quaternary International*, 88, 45-56.
- SIANI G., SULPIZIO R., PATERNE M., & SBRANA A., 2004 - Tephrostratigraphy study for the last 18,000 ¹⁴C years in a deep-sea sediment sequence for the South Adriatic. *Quaternary Science Reviews*, 23, 2485-2500.
- SIMKIN T., & SIEBERT L., 1994 - *Volcanoes of the World, 2ème édition*. Géoscience Press in association with the Smithsonian Institution Global Volcanism Program, Tucson AZ, 368 p.
- THÉOBALD N., THIÉBAUT J., & BERNATZKY M., 1973 - Carte et notice géologiques "Girromagny". Editions du BRGM.
- TURNEY C.S.M., 1998 - Extraction of rhyolitic component of Vedde microtephra from minerogenic lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 19, 199-206.
- TURNEY C.S.M., HARKNESS D.D., & LOWE J.J., 1997 - The use of microtephra horizons to correlate Late-glacial lake sediment successions in Scotland. *Journal of Quaternary Science*, 12, 525-531.
- TURNEY C.S.M., LOWE J., DAVIES S., HALL V., LOWE D.J., WASTEGÅRD S., HOEK W.Z., & HALLOWAY B., 2004 - Tephrochronology of Last Termination Sequences in Europe: a protocol for improved analytical precision and robust correlation procedure (a joint SCOTAV-INTIMATE proposal). *Journal of Quaternary Science*, 19, 111-120.

- TURNEY C.S.M., VAN DEN BURG K., WASTERGÅRD S., DAVIES S.M., WHITEHOUSE N.J., PILCHER J.R., & CALLAGHAN C., 2006** - North European last glacial-interglacial transition (LGIT; 15-9 ka) tephrochronology: extended limits and new events. *Journal of Quaternary Science*, **21** (4), 335-345.
- VAN DEN BOGAARD P., & SCHMINCKE H., 1985** - Laacher See tephra: A widespread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. *Geological Society of America Bulletin*, **96**, 1554-1571.
- VAN DEN BOGAARD P., 1995** - ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of sanidine phenocrysts from Laacher See tephra (12,900 yr BP): chronostratigraphic and petrological significance. *Earth and Planetary Science Letters*, **133**, 163-174.
- VANNIÈRE B., BOSSUET G., WALTER-SIMONNET A.V., RUFFALDI P., ADATTE T., ROSSY M., & MAGNY M., 2004** - High-resolution record of environmental changes and tephrochronological markers of the Last Glacial-Holocene transition at Lake Lautrey (Jura, France). *Journal of Quaternary Science*, **19**, 797-808.
- VERNET G., & RAYNAL J.-P., 2004** - Hommes et volcans en Basse Auvergne préhistorique. *Revue d'Auvergne*, 23 p.
- VERNET G., RAYNAL J.-P., MIALLIER D., PILLEYRE T., FAIN J., SANZELLE S., & MONTRET M., 1990** - La retombée de la Moutade, marqueur stratigraphique de l'Allerød en Limagne septentrionale (Massif Central, France). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **310**, série II, 1077-1082.
- VIVENT D., & VERNET G., 2001** - Apport de la palynologie à l'étude des retombées volcaniques tardiglaciaires et holocènes de la Chaîne des Puys enregistrées en Limagne (France). In E. Juvigné & J.P. Raynal (eds), *Tephros, Chronology, Archaeology*. Les dossiers de l'Archéo-Logis, **1**, CDERAD ed., 255-262.
- WASTEGÅRD S., 2002** - Early to middle Holocene silicic tephra horizons from the Katla volcanic system, Iceland: new results from the Faroe Islands. *Journal of Quaternary Science*, **17**, 723-730.
- WASTEGÅRD S., 2005** - Late Quaternary tephrochronology of Sweden: a review. *Quaternary International*, **130**, 49-62.
- WASTEGÅRD S., BJÖRK S., POSSNERT G., & WOHLFARTH B., 1998** - Evidence for the occurrence of Vedde Ash in Sweden: radiocarbon and calendar age estimates. *Journal of Quaternary Science*, **13**, 271-274.
- WASTEGÅRD S., TURNEY C.S.M., LOWE J.J., & ROBERTS S.J., 2000 a** - New discoveries of the Vedde Ash in southern Sweden and Scotland. *Boreas*, **29**, 72-78.
- WASTEGÅRD S., WOHLFARTH B., SUBETTO D.A., & SAPELKO T.V., 2000 b** - Extending the known distribution of the Younger Dryas Vedde Ash into north-western Russia. *Journal of Quaternary Science*, **15**, 581-586.
- WEGMÜLLER S., & WELTEN M., 1973** - Spätglaziale Bimstufungen des Laacher Vulkanismus im Gebiet der westlichen Schweiz und der Dauphiné (Fr.). *Eclogae Geologica Helvetica*, **66**, 3, 533-541.
- WICK L., 2000** - Vegetational responses to climatic changes recorded in Swiss lake sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **159**, 231-250.
- WOHLFARTH B., 1996** - The chronology of the last termination: a review of radiocarbon-dated, high-resolution terrestrial stratigraphies. *Quaternary Science Reviews*, **15**, 267-284.
- WULF S., 2000** - *Des tephrochronologische Referenzprofil des Lago Grande di Monticchio*. Dissertation, GeoForschungsZentrum Potsdam, 125 p.
- WULF S., KRAML M., BRAUER A., KELLER J., & NEGENDANK J.F.W., 2004** - Tephrochronology of the 100 ka lacustrine sediment record of Lago Grande di Monticchio (Southern Italy). *Quaternary International*, **122**, 7-30.
- ZANCHETTA G., DI VITO M., FALLICK A.E., & SULPIZIO R., 2000** - Stable isotopes of pedogenic carbonates from the Somma-Vesuvius area, southern Italy, over the past 18 kyr: palaeoclimatic implications. *Journal of Quaternary Sciences*, **15**, 813-824.
- ZILLÈN L., WASTEGÅRD S., & SNOWBALL I., 2002** - Calendar year ages of three mid-holocene tephra layers identified in varved lake sediments in west central Sweden. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 1584-1591.
- ZOLITSCHKA B., & NEGENDANK J.F.W., 1996** - Sedimentology, dating and paleoclimatic interpretation of a 76.3 ka record from Lago Grande di Monticchio, southern Italy. *Quaternary Science Reviews*, **15**, 101-112.
- ZOLITSCHKA B., NEGENDANK J.F.W., & LOTTERMOSER B.G., 1995** - Sedimentological provee and dating of the early Holocene volcanic eruption of Ulmener Maar (Vulkaneifel, Germany). *Geologische Rundschau*, **84**, 213-219.