

L'ÉTALONNAGE DU TEMPS DU RADIOCARBONE PAR LES CERNES D'ARBRES. L'APPORT DES SÉRIES DENDROCHRONOLOGIQUES DU GISEMENT DE BOIS SUBFOSSILES DU TORRENT DES BARBIERS (ALPES FRANÇAISES DU SUD)



Cécile MIRAMONT¹, Olivier SIVAN², Frédéric GUIBAL¹, Bernd KROMER³,
Sahra TALAMO⁴ & Klaus Félix KAISER^{5,6}

RÉSUMÉ

L'étalonnage de l'échelle des temps du radiocarbone repose sur la datation de chronologies absolues de cernes (chronologies de référence). L'incision récente des dépôts alluviaux tardiglaciaires du torrent des Barbières (région de la Moyenne Durance, Alpes du Sud) a fourni un gisement de pins sylvestres subfossiles, datés au radiocarbone de la transition entre l'Alleröd et le Dryas Récent. Leur analyse dendrochronologique a permis de construire deux chronologies flottantes (BARBA et BARBB). Par la méthode du wiggle matching, ces chronologies permettent de couvrir le hiatus temporel existant entre le début de la chronologie de référence européenne (12 594 cal. BP, Schaub, 2008a; Hua *et al.*, 2009) et la fin de la longue chronologie flottante suisse (Kaiser *et al.*, 2010), fournissant ainsi un calendrier continu du temps du radiocarbone pour les derniers 14 300 ans. Malheureusement les chronologies suisses et françaises ne sont pas encore interdatées.

Mots-clés : bois subfossile, *Pinus sylvestris*, Tardiglaciaire, radiocarbone, chronologie absolue, chronologies flottantes, «wiggle matching»

ABSTRACT

RADIOCARBON TIME SCALE CALIBRATION USING TREE RINGS. CONTRIBUTION OF FRENCH SUBFOSSIL TREE-RING CHRONOLOGIES AT BARBIERS RIVER (SOUTHERN FRENCH ALPS)

Radiocarbon time scale calibration is based on dated absolute chronologies. River bank incision in the Barbières River (Moyenne Durance, Southern French Alps) reveals numerous lateglacial subfossil Scots pines. Trunks are dated at the end of the Alleröd and the beginning of Younger Dryas. Dendrochronological analyses allow building two floating mean chronologies (BARBA and BARBB). Using wiggle matching method, these chronologies fill the gap between absolute European chronology (with end at 12 594 cal. BP, Schaub, 2008a; Hua *et al.*, 2009) and the long Swiss floating chronology (Kaiser *et al.*, 2010). Thereby, a continuous radiocarbon timeframe is available until 14 300 cal. BP. Unfortunately, French and Swiss chronologies are not cross-dated.

Key-words: subfossil wood, Scots pines, Lateglacial, radiocarbon, absolute chronologies, floating chronology, wiggle matching

1 - INTRODUCTION

La datation au radiocarbone (¹⁴C) constitue un outil universel et incontournable pour dater de façon absolue les vestiges organiques, sur lesquels reposent les reconstitutions paléoenvironnementales, paléoclimatiques et archéologiques. Néanmoins, il est indispensable que les âges ¹⁴C (exprimés en années BP, Before Present, le présent étant fixé par convention en 1950) puissent être étalonnés avec précision sur le calendrier solaire (âges

exprimés en années calendaires : cal. BP).

En effet, les dates radiocarbone ne sont pas exactement identiques aux années calendaires et ce décalage augmente lorsque l'on s'éloigne dans le temps. Cette différence entre les deux chronomètres, mise en évidence en mesurant l'âge radiocarbone des cernes de croissance de vieux arbres d'âges connus (Linick *et al.*, 1986; Pearson *et al.*, 1993; Pearson & Stuiver, 1993; Stuiver & Becker, 1993; Stuiver & Pearson, 1993) est due à la variabilité de la quantité de ¹⁴C dans l'atmosphère. Ces variations sont liées à des

¹ Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléocologie, UMR 6116-CNRS, Europôle méditerranéen de l'Arbois, Bâtiment Villemin, BP 80, F-13545 AIX-EN-PROVENCE cedex 04. *Courriel* : cecile.miramont@univ-provence.fr

² Institut National de Recherches Archéologiques Préventives / CEPAM UMR 6130-CNRS, 24 avenue de la Grande Bégude - Immeuble le Mozart, F-13770 VENELLES.

³ Heidelberg Academy of Sciences, INF 229, D-69120 HEIDELBERG.

⁴ Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Department of Human Evolution, D-04103 LEIPZIG.

⁵ Swiss Fed. Research Institute WSL, CH-8903 BIRMENSdorf.

⁶ Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 ZURICH.

changements de production du radiocarbone dans la haute atmosphère en fonction de variations de l'activité solaire (de Vries, 1958, 1959; Stuiver, 1961; Stuiver & Quay, 1980; Goslar *et al.*, 2000; Muscheler *et al.*, 2000) et de changements de l'intensité du champ magnétique terrestre (Snowball & Sandgren, 2002; St-Onge *et al.*, 2003). De plus, les variations d'intensité de la circulation océanique peuvent aussi modifier la teneur en radiocarbone de l'atmosphère par remontée d'eaux profondes pauvres en ^{14}C (Edwards *et al.*, 1993; Mikolajewicz, 1996; Stocker & Wright, 1996; Hughen *et al.*, 2000; Muscheler *et al.*, 2000; Delaygue *et al.*, 2003).

La calibration du radiocarbone, jusqu'au début de l'Holocène, est réalisée grâce aux séries dendrochronologiques de référence pluri-millénaires (ou chronologies absolues) établies à partir de bois archéologiques et de bois subfossiles (non encore minéralisés) (Stuiver *et al.*, 1998a,b; Reimer *et al.*, 2004, 2010). Pour les périodes antérieures, la calibration du radiocarbone est effectuée sur des enregistrements marins de varves, de coraux ou des spéléothèmes (Reimer *et al.* 2002, 2004; Bard *et al.* 2004; Hughen *et al.*, 2004). Les eaux de surface où vivent les organismes marins possédant une teneur en radiocarbone intermédiaire entre l'atmosphère et les eaux profondes pauvres en ^{14}C , les organismes de milieu océanique sont systématiquement vieillissés de 400 ans. Ce décalage d'âge entre des organismes contemporains marins et continentaux, que l'on appelle l'effet-réservoir mondial (R), est d'environ 400 ans pour l'ensemble de l'Holocène. Mais Stuiver and Braziunas (1993), Fairbanks *et al.* (2005), Kromer *et al.* (2004), Cao *et al.* (2007) et Hua *et al.* (2009) montrent que R n'est pas

uniforme dans le temps ni dans l'espace en particulier pour le Tardiglaciaire, induisant ainsi des incertitudes dans la calibration des temps radiocarbone.

Pour cette raison, il apparaît aujourd'hui fondamental de prolonger la courbe de calibration du ^{14}C obtenue à partir des chronologies de cernes d'arbres, seules proxys pouvant fournir des mesures fiables de la teneur en radiocarbone atmosphérique à une échelle de temps calendaire. A l'heure actuelle, la plus longue chronologie servant de référence pour la calibration du radiocarbone couvre les 12 594 dernières années (Schaub *et al.*, 2008a; Hua *et al.*, 2009). Au-delà de cette date existent des chronologies dites «flottantes», c'est-à-dire non raccordées à la chronologie absolue, remontant jusqu'au Bölling. Le but de cet article est de présenter les résultats récents obtenus à partir des séries de cernes de bois subfossiles découverts dans le Sud de la France et en particulier dans le torrent des Barbiers. Ces séries dendrochronologiques, bien datées au ^{14}C , apportent des données prometteuses pour une extension de la chronologie absolue et de la courbe de calibration du radiocarbone.

2 - CONTEXTE, SITE ET MATÉRIEL D'ÉTUDE

2.1 - LES GISEMENTS DE PINS SYLVESTRES SUBFOSSILES DE MOYENNE DURANCE

En France, c'est dans la région de la Moyenne Durance (Alpes du Sud) que sont connus de nombreux gisements d'arbres subfossiles holocènes et tardiglaciaires (fig. 1)

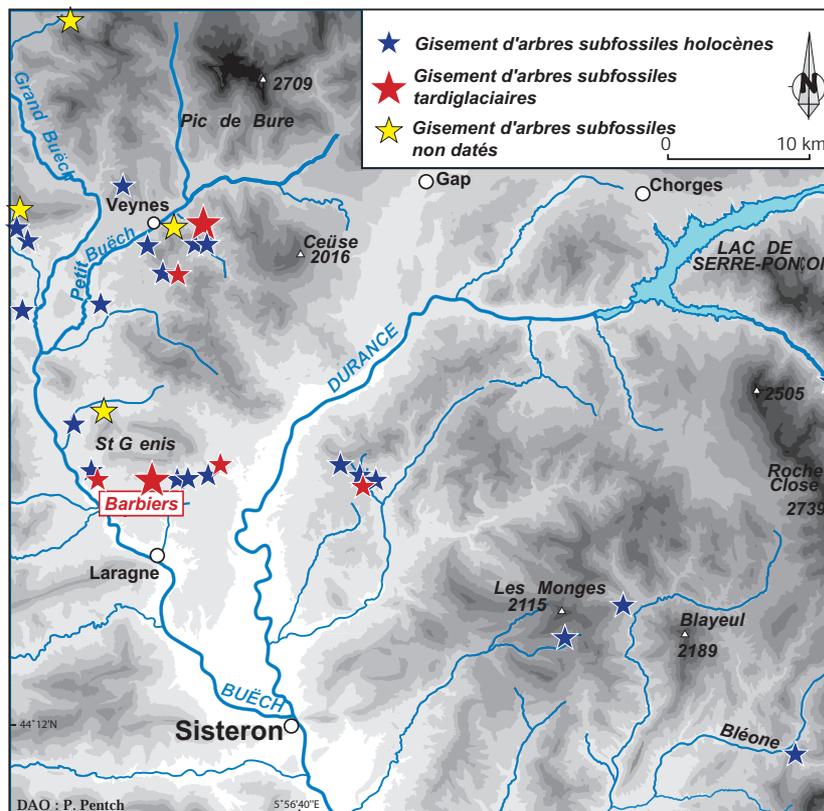


Fig. 1 : Localisation du site étudié, le torrent des Barbiers, et des gisements d'arbres subfossiles dans les Alpes du Sud.
Fig. 1: Geographic location of the study site, Barbiers River, and of subfossil tree sites in Southern French Alps.

(Archambault, 1967, 1968; Delibrias *et al.*, 1984; Gautier, 1992; Rosique 1994, 1996; Miramont, 1998; Rousset & Guiomar, 1999; Sivan, 2002; Miramont *et al.*, 2000a,b; Magny *et al.*, 2002; Sivan *et al.*, 2006; Sivan & Miramont, 2008).

L'existence de troncs d'arbres fossilisés dans cette région est étroitement liée au contexte géologique, climatique et à l'histoire géomorphologique des fonds alluviaux. En effet, la région sud-alpine est caractérisée par l'importance des affleurements marneux facilement érodables («terres noires» callovo-oxfordiennes), des dénivelées importantes et des conditions climatiques méditerranéennes et monta-gnards marquées par des précipitations pouvant être très intenses. Ainsi, des processus sédimentaires favorables à la fossilisation de troncs d'arbres par de forts taux de sédimentation ont été particulièrement actifs au cours de l'Holocène.

Après le dernier maximum glaciaire (environ 21 000 cal. BP) durant lequel le glacier de la Durance atteignait la région de Sisteron (Jorda *et al.*, 2000), les rivières connaissent, au début du Tardiglaciaire (*ante* 15 000 cal. BP), une phase d'incision. Puis, du Bölling jusqu'au milieu de l'Holocène (14 500-7300 cal. BP), les pieds de versants et les vallons enregistrent des décharges détritiques très abondantes et des taux de sédimentation rapides qui aboutissent à la mise en place du «Remblaiement Postglaciaire Principal» (Miramont *et al.*, 2004, 2008). De nombreux arbres (pins sylvestres) sont alors fossilisés *in situ* par des dépôts de crue très épais. Ces décharges détritiques soudaines ont permis une très bonne préservation des troncs d'arbres autour desquels on retrouve encore des lambeaux d'écorce. Les fûts et les branches qui n'ont pas été enfouis n'ont pas été conservés. Postérieurement à 7300 cal. BP, la tendance à la sédimentation alluviale s'atténue et on ne retrouve que rarement des troncs d'arbres fossilisés (Rousset & Guiomar, 1999; Sivan, 2002). Récemment, les rivières connaissent une tendance marquée à l'incision linéaire, mettant ainsi au jour les bois subfossiles.

Les souches apparaissent dans les fonds des torrents ou dans les berges, parfois sur plusieurs niveaux stratigraphiques superposés (fig. 2). Les diamètres moyens des souches atteignent une trentaine de centimètres et leur hauteur conservée est d'environ un mètre. Les âges moyens sont ceux d'individus adultes, entre 130 et 300 ans au moment de leur fossilisation.

Les analyses dendrochronologiques et la datation au radiocarbone de plusieurs dizaines d'arbres subfossiles répartis dans plusieurs dizaines de torrents montrent l'existence de phases de fossilisation des pins, synchrones à l'échelle des Alpes du sud. L'ensevelissement des bois témoigne vraisemblablement d'une recrudescence de l'intensité et de l'irrégularité des pluies responsables des crues dans les torrents. Certaines de ces phases sont contemporaines d'oscillations climatiques reconnues ailleurs en Europe (Magny *et al.*, 2002; Sivan *et al.*, 2006; Sivan & Miramont, sous presse).

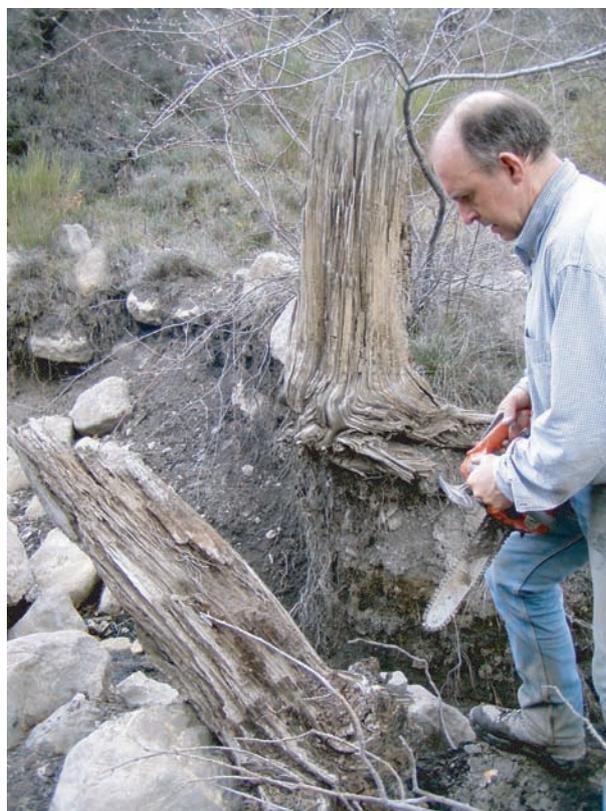


Fig. 2 : Troncs d'arbres subfossiles (pins sylvestres) dans le torrent des Barbières.

Fig. 2: Trunks of subfossil Scots pines in Barbières River.

2.2 - LE TORRENT DES BARBIÈRES

Le torrent des Barbières (44°21'11"N; 5°49'50"E) se situe sur le piémont sud de la Montagne de St-Genis (fig. 3). Il s'inscrit de l'aval vers l'amont, dans les marnes et marno-calcaires du Jurassique moyen et supérieur (Bathonien, Callovo-Oxfordien) avant de buter, en tête de bassin, sur les crêts sommitaux armés des calcaires résistants de la fin du Jurassique supérieur (faciès tithonique). De grands niveaux de glaciais étagés se développent à la base de la corniche tithonique. Les plus hauts niveaux, constitués de matériel cryoclastique, de galets ou de blocs décimétriques ou de matériel morainique sont attribués au Riss (Gidon *et al.*, 1991). Les glaciais de bas niveaux, attribués au Würm, ont une couverture sédimentaire beaucoup moins épaisse. L'ensemble de ces matériaux pléistocènes constitue un stock sédimentaire important qui a contribué à nourrir les formations plus récentes. Les dépôts tardiglaciaires et holocènes constituant le Remblaiement Postglaciaire Principal et contenant les arbres subfossiles sont localisés en contrebas des différents niveaux de glaciais. Ils comblent la dépression de Lazer (70 m de remplissage) et constituent un niveau de terrasse le long des torrents dont l'épaisseur peut atteindre jusqu'à une vingtaine de mètres.

Le gisement de bois subfossiles du torrent des Barbières a été repéré en 2000 (Sivan, 2002; Sivan & Miramont, 2008). Récemment, de nouveaux arbres y ont été découverts. Au total, dix-huit arbres sont recensés,

répartis dans trois ravins affluents (fig. 4 et fig. 5A). Les arbres sont enracinés dans trois niveaux de sédiments superposés correspondant à la colonisation végétale de plages de sédiments abandonnées par des épisodes détritiques (fig. 5B).

Les arbres du site des Barbiers sont datés de la tran-

sition entre l'Alleröd et le Dryas Récent (cf. 4.1). Ce site revêt ainsi une importance majeure puisque les séries dendrochronologiques offrent la potentialité de remonter au-delà de la chronologie absolue européenne et de couvrir le hiatus temporel la séparant des chronologies flottantes tardiglaciaires.

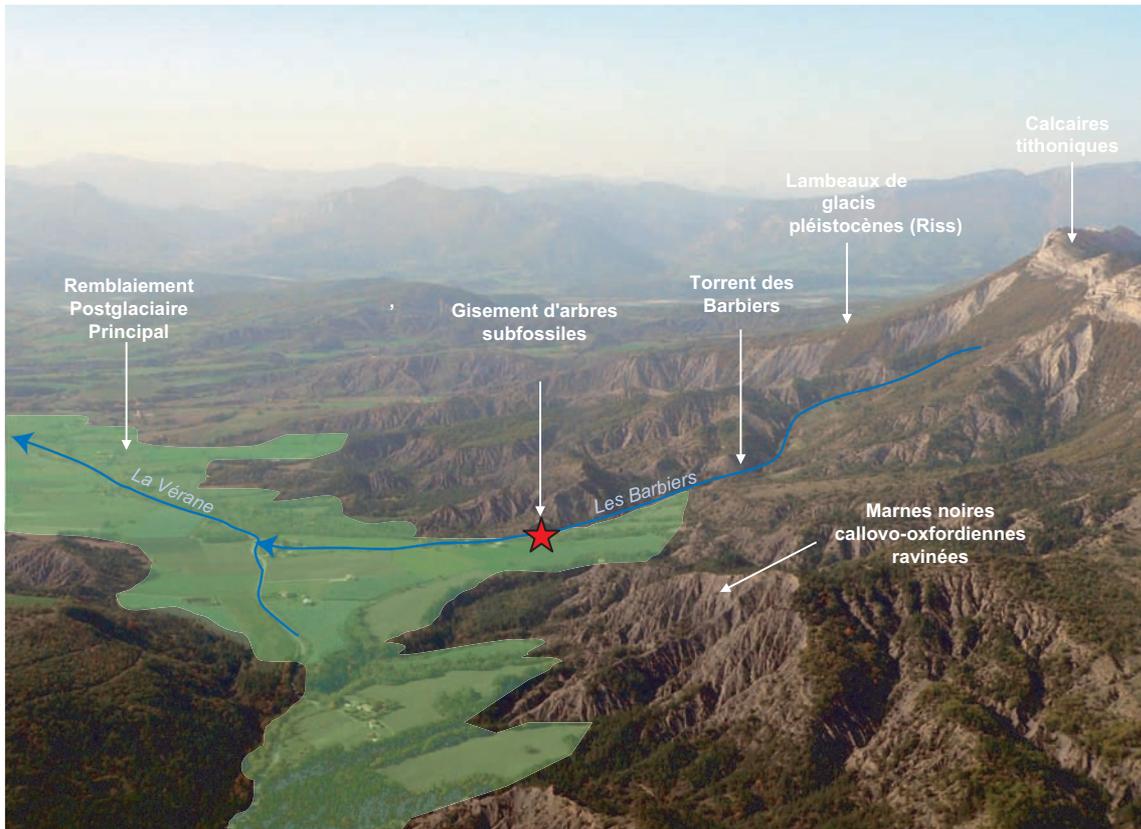


Fig. 3 : Vue aérienne du versant sud de la Montagne de Saint-Genis (Lazer, Hautes-Alpes).

Fig. 3: Aerial photography of the southern slope of Saint-Genis Mountain (Lazer, Hautes-Alpes).



Fig. 4 : Le site du torrent des Barbiers avec les bois subfossiles apparaissant dans les berges.

Fig. 4: Barbiers River site with subfossil trunks in river banks.

3 - MÉTHODE

Sur le terrain, les arbres sont dégagés à la pioche de leur gangue limoneuse. Un disque (ou galette) de chaque souche est prélevé à l'aide d'une tronçonneuse.

Au laboratoire, les échantillons des bois en bon état de conservation sont mis à sécher puis poncés. Les échantillons trop dégradés ont été préservés humides puis décupés à la lame de rasoir.

Les chronologies de cernes sont mesurées sous loupe binoculaire. Trois ou quatre rayons sont mesurés sur chaque disque (chronologies élémentaires). Après vérification de leur concordance, les chronologies élémentaires sont moyennées pour obtenir une chronologie individuelle ou chronologie d'arbre. Les chronologies individuelles sont ensuite interdatées pour construire des chronologies moyennes.

L'interdatation des chronologies est effectuée à l'aide du logiciel TSAP (Rinn, 2005). Les tests de synchronisation utilisés sont le pourcentage de coïncidence ou Gleichlaufigkeit % (GLK), le test *t* de Student calculé sur les séries indicées (Baillie & Pilcher, 1973). Nous ne retenons que les synchronismes apparaissant sur des périodes de temps supérieures à 70 ans. Les positions relatives des chronologies de cernes proposées par les tests statistiques font systématiquement l'objet d'une vérification visuelle (Tab. 1).

Chaque arbre a fait l'objet de plusieurs datations au radiocarbone. Elles ont été réalisées sur des séquences de 10 cernes consécutifs repérés dans les chronologies. Les datations ont été calibrées à l'aide du logiciel de calibration Calib 6.0 (Copyright 1986-2009, M. Stuiver & P.J. Reimer).

4 – RÉSULTATS

4.1 - CHRONOLOGIES DE CERNES ET DATATIONS RADIOCARBONE DANS LE TORRENT DES BARBIERS

Les datations des arbres subfossiles du torrent des Barbiers s'échelonnent entre 10400 et 11200 BP (fig. 5). Trois niveaux d'arbres se succèdent, attestant la

colonisation progressive des alluvions dans les fonds de vallons en voie de colmatage.

La première génération d'arbres, représentée par les troncs 15 et 18 dans le ravin 3, se met en place à la fin de l'Alleröd, vers 11100 BP. Ces arbres sont à l'évidence contemporains car enracinés sur le même niveau stratigraphique à quelques mètres de distance mais la comparaison de leurs chronologies de cernes ne permet pas de le prouver.

La seconde génération (troncs 4, 5, 7, 9, 12, 13, 14, 16 et 17) située environ 2 m au-dessus de la première, est constituée par des arbres situés dans les ravins 2 et 3. Ces arbres sont datés de la transition entre l'Alleröd et le Dryas, entre 10600 et 11000 BP. Deux chronologies moyennes BARBA (6 arbres) et BARBB (3 arbres) ont été construites (fig. 6).

Enfin, une troisième génération d'arbres (troncs 1, 2, 3, 8 et 10) se met en place lors de la première partie du Dryas Récent. Leurs datations, situées autour de 10400 BP sur un plateau radiocarbone, ne permettent pas de les caler avec précision dans le temps. Leurs chronologies individuelles ne s'interdatent pas alors que là encore, ces arbres sont certainement contemporains car enracinés à proximité les uns des autres.

Les patrons de croissance des arbres subfossiles du torrent des Barbiers, comme ceux des autres sites de Moyenne Durance, possèdent des allures très particulières. Des chutes de croissance brutales sont fréquentes au cours de la vie des pins. Des séries de cernes très minces et des cicatrices ponctuent la croissance des arbres montrant qu'ils ont enduré des stress importants, vraisemblablement liés à l'ensevelissement des troncs dans des dépôts de crue et à l'asphyxie de leur système racinaire (fig. 6 et 7). C'est le cas par exemple des arbres 4, 12 ou 14. Ces anomalies de croissance sont à l'origine des difficultés rencontrées dans la synchronisation des séquences de cernes.

4.2 - UN RACCORD TEMPOREL POSSIBLE ENTRE LES CHRONOLOGIES FLOTTANTES ET LA CHRONOLOGIE ABSOLUE

La partie la plus ancienne de la chronologie absolue européenne est constituée par la chronologie moyenne YDB construite à partir de pins fossilisés dans des dépôts

BARBA (6 trees)						
	BARB4	BARB12	BARB13	BARB14	BARB9	BARB17
BARB4		71/7.3	69/4.5	52/1.9	72/4.9	60/2
BARB12	71/7.3		63/2.9	52/0.8	62/4.4	64/3.4
BARB13	69/4.5	63/2.9		68/4.4	62/2.8	/
BARB14	52/1.9	52/0.8	68/4.4		56/0.6	/
BARB9	72/4.9	62/4.4	62/2.8	56/0.6		/
BARB17	60/2	64/3.4	/	/	/	

BARBB (3 trees)			
	BARB5	BARB7	BARB16
BARB5		67/4	54/3.8
BARB7	67/4		47/0.7
BARB16	54/3.8	47/0.7	

Tab. 1 : Synchronisation des chronologies individuelles. Les valeurs du pourcentage de coïncidence Gleichlaufigkeit % (GLK) et du test *t* de Student calculé sur les séries indicées sont indiquées pour chaque couple d'arbres dans la position retenue.

Tab. 1: Cross-dating of tree chronologies. For each couple of trees, values of the Percentage for Parallel Variation Gleichlaufigkeit % (GLK) and of the Student's t-test are indicated in the selected position.

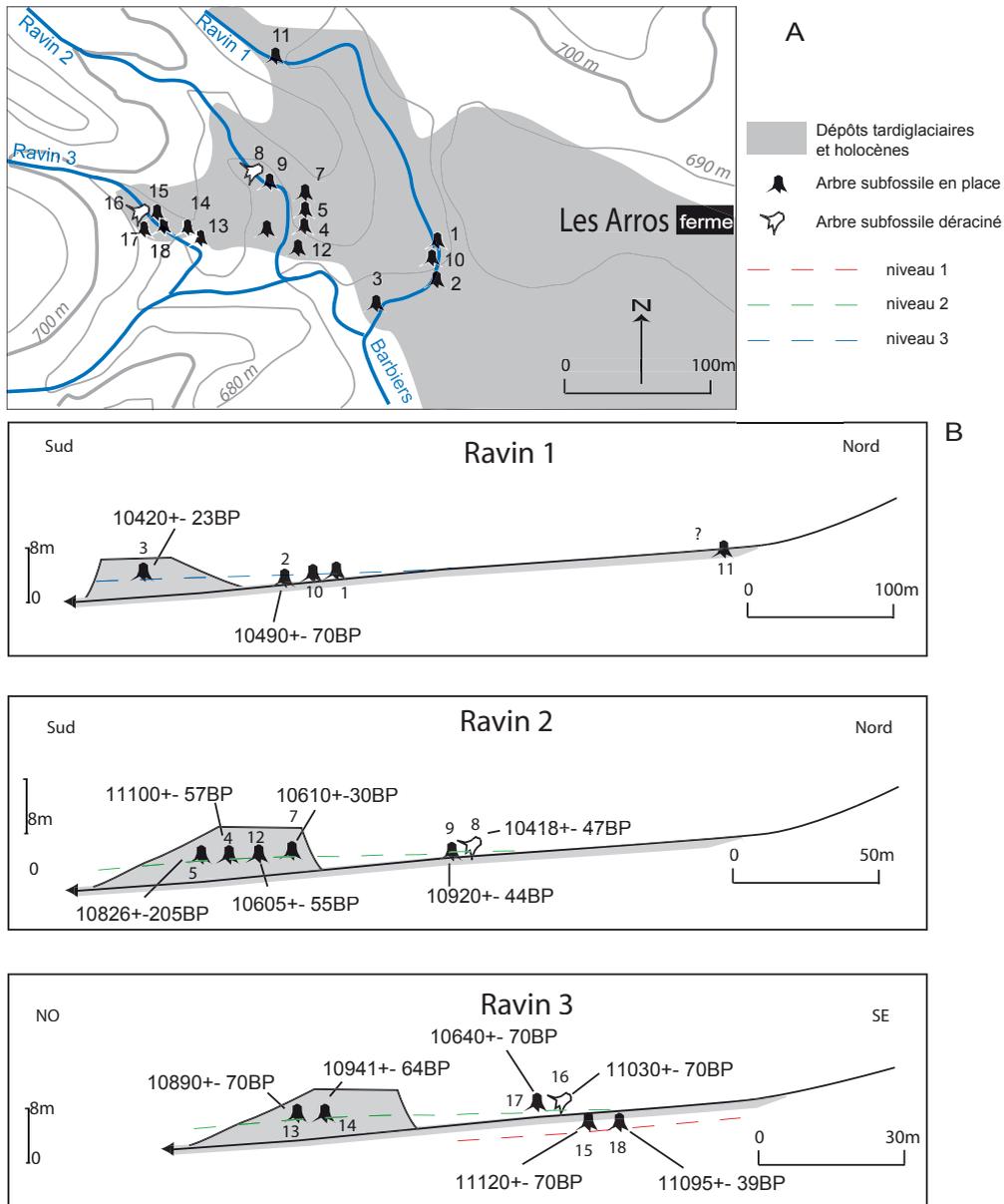


Fig. 5: Cartographie du gisement de bois subfossiles du torrent des Barbiers. A: Localisation des bois subfossiles. B: Profils longitudinaux des trois affluents du site des Barbiers.

Fig. 5: Cartography of the subfossil trunks in the Barbiers River site. A. Location of subfossil trunks. B. Longitudinal profiles of the three tributaries of Barbiers River site.

colluviaux de la région de Zurich (fig. 8, Schaub, 2007; Schaub *et al.*, 2008a; Hua *et al.*, 2009).

Au-delà de cette date, un hiatus sépare la chronologie absolue des chronologies flottantes tardiglaciaires. Ces dernières proviennent des Alpes françaises du Sud (Sivan & Miramont, 2008; Miramont *et al.*, 2000a,b), du Nord de l'Italie (Friedrich *et al.*, 1999), du plateau suisse (Kaiser, 1993; Schaub *et al.*, 2005, 2008a,b; Schaub, 2007), et d'Allemagne (Friedrich *et al.*, 1999, 2001). La plus longue est la chronologie flottante suisse SWILM (Swiss Lateglacial Master chronology) qui couvre 1606 années (Kaiser *et al.*, 2010). Au-delà de toute attente, Friedrich *et al.* (2001) et Kaiser *et al.* (2010) sont parvenus à synchroniser, avec de très bons coefficients de corrélation, les séquences de cernes provenant du nord, de l'est, du sud de l'Allemagne, de la région de Zurich et du nord de l'Italie, construisant ainsi

la chronologie CELM (Central European Lateglacial Master Chronology). Ce résultat suggère l'importance du contrôle des températures sur la croissance des arbres (*Pinus silvestris*) au Tardiglaciaire et laisse espérer l'interdatation prochaine des chronologies absolues et flottantes permettant ainsi de combler le hiatus et de rallonger la chronologie absolue de plus de 1600 ans.

Les arbres du site des Barbiers ont été comparés à ceux de la chronologie absolue YDB et à la partie la plus récente de la chronologie flottante SWILM. Malheureusement, aucune synchronisation entre les chronologies suisses et françaises n'a pu être établie, vraisemblablement en raison des perturbations de croissance de nos arbres stressés mais peut-être aussi d'un contexte climatique régional différent.

Néanmoins, la méthode du «wigggle matching» (mise en concordance des oscillations des nuages de points

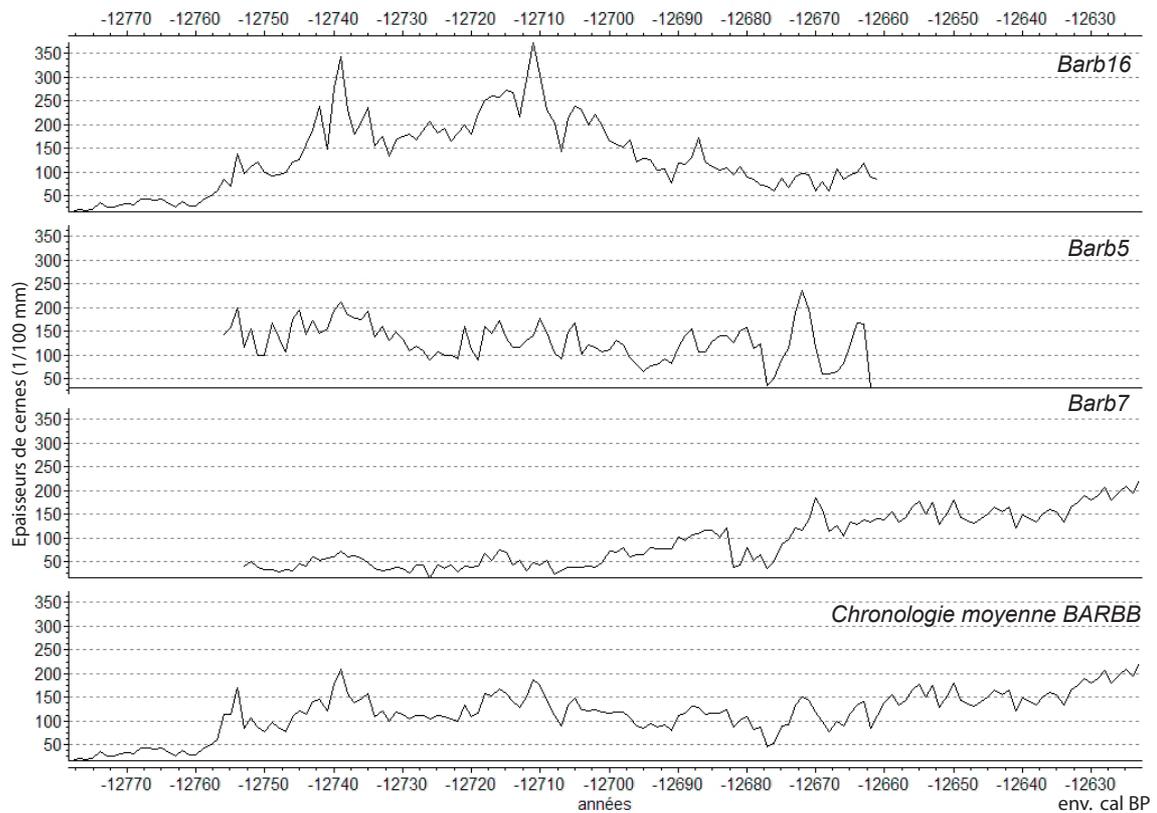
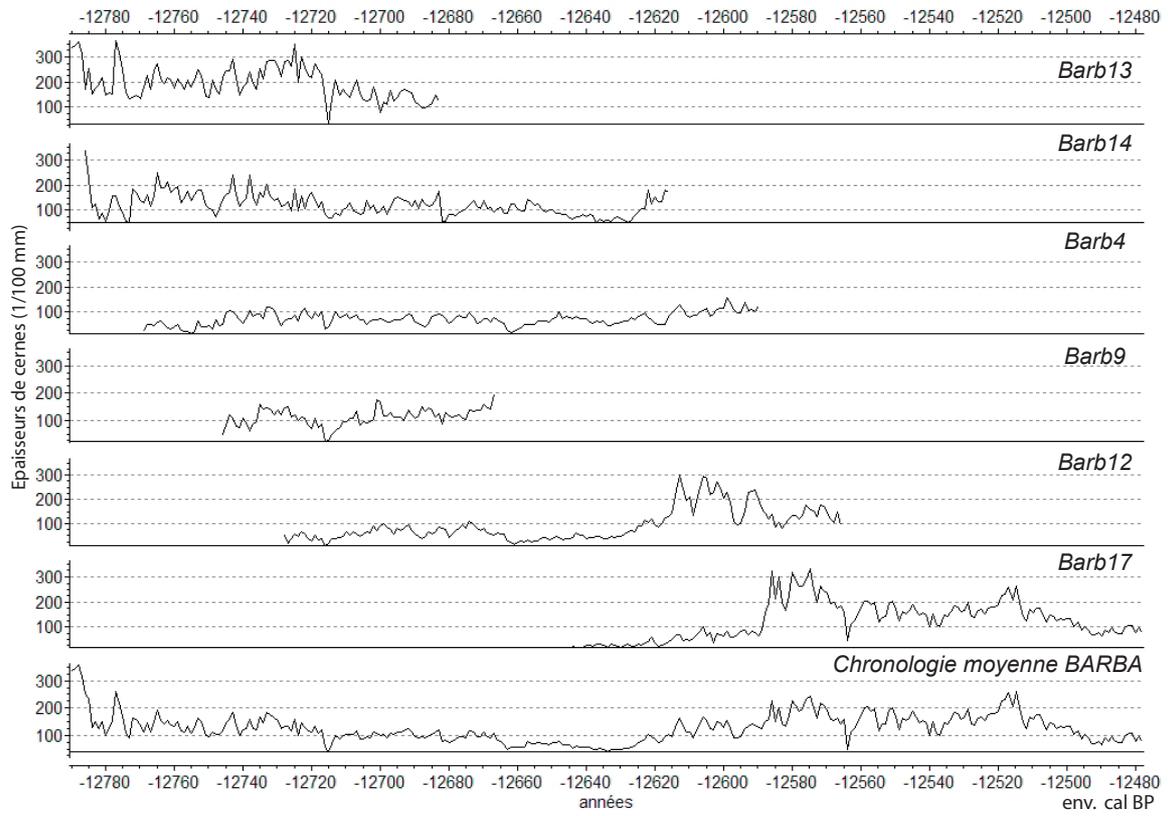


Fig. 6 : Chronologies individuelles composant les chronologies moyennes BARBA et BARBB.

Fig. 6: Tree-ring curves composing floating averaged chronologies BARBA and BARBB.



Fig. 7: Une cicatrice dans un disque de pin sylvestre subfossile (torrent des Barbières).

Fig. 7: A scar in a disc of subfossil Scots pine (Barbières River).

représentant les datations radiocarbone des cernes de croissance) permet de positionner précisément dans le temps les séquences des cernes (fig. 8). Les deux chronologies moyennes BARBA et BARBB datées entre 11 050 et 10 600 BP enregistrent, comme la partie récente de la chronologie tardiglaciaire flottante SWILM, la chute soudaine des âges radiocarbone caractérisant le début du Dryas Récent (Kromer *et al.*, 2004). De plus, la forme du nuage de points constitué par les dates ^{14}C réalisées sur l'arbre Barb17 composant la fin de la chronologie BARBA est similaire à celle des dates ^{14}C des arbres constituant le début de la

chronologie absolue (YDB). Ainsi les séquences dendrochronologiques des Barbières recouvrent le hiatus temporel entre la chronologie absolue et les chronologies tardiglaciaires flottantes.

Nos résultats sont en parfaite concordance avec les données publiées par Hua *et al.* (2009) qui, grâce à la méthode du «wiggly matching» proposent de relier la chronologie absolue et les chronologies flottantes tardiglaciaires européennes (fig. 8). La liaison est réalisée grâce à des datations ^{14}C d'arbres subfossiles (Huon Pine, *Lagarostrobos franklinii*) découverts dans les alluvions de la rivière Stanley dans le nord-ouest de la Tasmanie. Il est rassurant que les résultats obtenus en Moyenne Durancie confirment ceux obtenus dans l'hémisphère sud. En effet, la croissance très lente et irrégulière qui caractérise l'espèce endémique *Lagarostrobos franklinii* empêche toute synchronisation des séquences individuelles entre elles. Par ailleurs, des incertitudes demeurent sur la variabilité spatio-temporelle de la teneur en radiocarbone atmosphérique entre les deux hémisphères (Hua *et al.*, 2009; Hogg *et al.*, 2009). Selon le calendrier dendrochronologique, l'augmentation du ^{14}C atmosphérique qui marque le début du Dryas Récent (~12 760 cal. BP) a lieu ~240 ans plus tard que dans l'enregistrement marin de Cariaco (Hughen *et al.*, 2000) qui ne reflète pas directement les variations du ^{14}C atmosphérique et qui est soumis à des changements d'effet-réservoir au cours du temps. Ainsi, pour l'intervalle 12 550-12 950 cal. BP, les données marines de Cariaco ne sont pas utilisées dans la nouvelle version de la courbe de calibration Intcal09 (Reimer *et al.*, 2010).

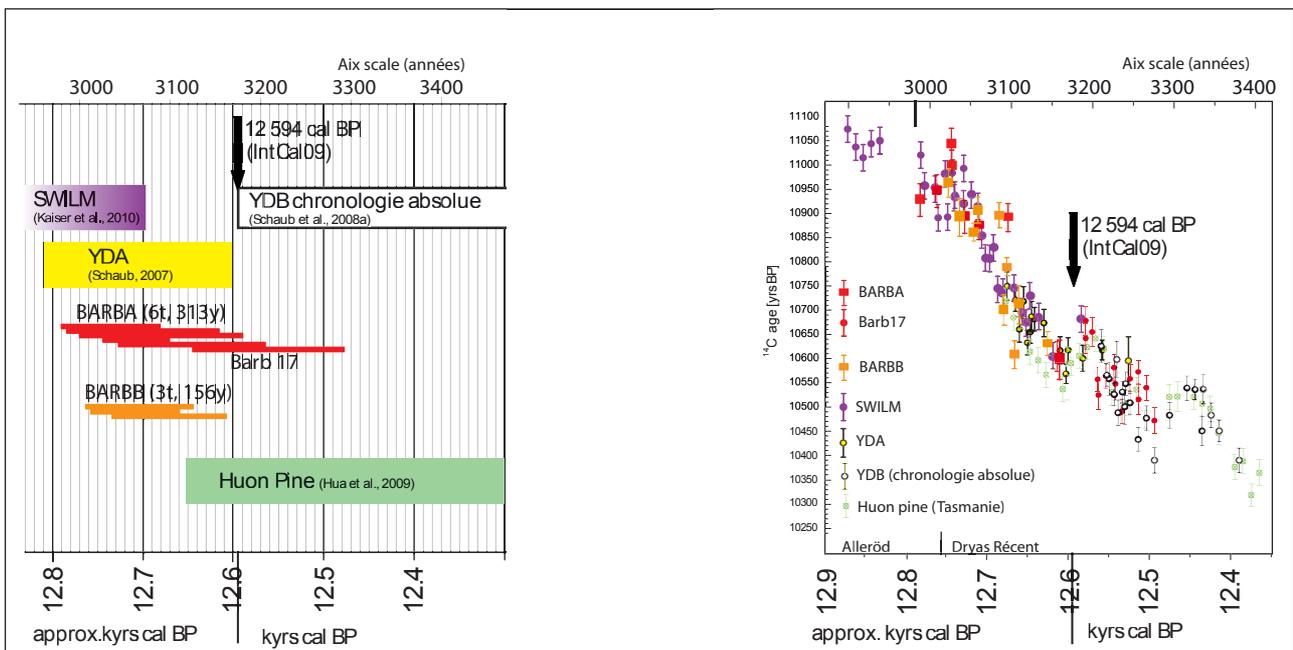


Fig. 8: Inventaire des chronologies flottantes et absolues européennes à la transition entre l'Allerød et le Dryas Récent.

A: Composition des chronologies. Le rectangle blanc représente la chronologie absolue. Les chronologies flottantes sont représentées en couleurs. B: Datations radiocarbone versus datations absolues. Deux échelles de temps sont indiquées : les échelles relatives (années dendrochronologiques) et les années calendaires.

Fig. 8: Inventory of European absolute and floating chronologies at the Allerød-Younger Dryas transition. A: Composition of chronologies. White bar represents the absolute chronology. Floating chronologies are coloured. B: Decadal ^{14}C age determinations versus tree-ring ages. Both timescales are indicated: relative timescales (tree-ring years) and cal. BP years.

5 - CONCLUSION

Les séquences de cernes des arbres subfossiles de la Moyenne Durance permettent, par la méthode du « wiggle matching », de couvrir le hiatus temporel entre la chronologie absolue qui remonte jusqu'en 12 594 cal. BP et la longue chronologie flottante tardiglaciaire suisse (SWILM), fournissant ainsi un calendrier continu du temps du radiocarbone pour les derniers 14 300 ans. Ce résultat particulièrement encourageant n'est toutefois pas confirmé par des tests de synchronisation. Ceci est d'autant plus surprenant que les séquences moyennes tardiglaciaires du nord, de l'est, du sud-est de l'Allemagne et du plateau Suisse montrent des résultats de synchronisation particulièrement concluants. La situation géographique de la Moyenne Durance, à l'abri des influences thermiques d'Europe du nord et de l'est, et exposée aux influences méditerranéennes explique sans doute cette absence de synchronisation. De plus, les perturbations de la croissance des arbres sous l'effet de stress géomorphologiques liés à leur enfouissement dans les dépôts alluviaux ajoutent une difficulté supplémentaire à l'interdatation.

La région des Alpes du sud bénéficie d'une situation méridionale qui en fait une région privilégiée pour y découvrir des bois subfossiles anciens, vestiges d'une recolonisation végétale précoce après le dernier maximum glaciaire. Ainsi, il est tentant de penser que, dans l'avenir, de nouvelles découvertes pourront autoriser les téléconnexions (Munaut, 1979) entre le nord, l'est et le sud des Alpes et combler ainsi le hiatus dendrochronologique.

REMERCIEMENTS

Les recherches ont été financées par l'ESF dans le cadre du programme EUROCLIMATE "Dendrochronology, ^{14}C time-scale and mechanisms of rapid climate change during the last deglaciation (TREE_14, FP14)" et par le CNRS dans le cadre du projet PICS n° 4418 « Longues séquences dendrochronologiques, calibration et reconstitutions paléoclimatiques au Tardiglaciaire en Europe médiane et méditerranéenne ». La partie du projet à Zurich a été financée par le « Tiefbauamt des Kantons Zurich » (Otto Schnell) et supportée par l'Institut de la Recherche WSL, Birmensdorf. R. Bourdin, C. Bouterlin, E. Brisset, H. Bruneton, J.L. Edouard, N. Fontvieille, A. Friedlander, Y. Monnier, F. Richard, T. Rosique, V. Robin, V. Tamisier, S. Valleteau et M. Weirich ont apporté leur concours lors des opérations de prélèvement des troncs sur le terrain. Que tous en soient remerciés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARCHAMBAULT M., 1967** - Découverte des restes d'une formation forestière fossile entre deux nappes colluviales quaternaires. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences. Série D, Sciences Naturelles*, **265** (7), 104-107.
- ARCHAMBAULT M., 1968** - Recensement provisoire des arbres et des formations forestières fossiles du bassin de la Moyenne Durance (Hautes Alpes). *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences. Série D, Sciences Naturelles*, **267** (12), 2101-2104 & 2284-2287.
- BAILLIE M.G.L., & PILCHER J.R., 1973** - A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin*, **33**, 7-14.
- BARD E., MENOT-COMBES G., & ROSTEK F., 2004** - Present status of radiocarbon calibration and comparison records based on Polynesian corals and Iberian Margin sediments. *Radiocarbon*, **46** (3), 1189-1202.
- CAO L., FAIRBANKS R.G., MORTLOCK R.A., & RISK M.J., 2007** - Radiocarbon reservoir age of high latitude North Atlantic surface water during the last deglacial. *Quaternary Science Reviews*, **26** (5/6), 732-742.
- DE VRIES H., 1958** - Variation in concentration of radiocarbon with time and location on Earth. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Series B, Physical Sciences*, **61** (2), 94-102.
- DE VRIES H., 1959** - Measurement and use of natural radiocarbon. In P.H. Abelson (ed.), *Researches in Geochemistry*. Wiley, New York, 169-189.
- DELAYGUE G., STOCKER T.F., JOOS F., & PLATTNER G.K., 2003** - Simulation of atmospheric radiocarbon during abrupt oceanic circulation changes: trying to reconcile models and reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, **22** (15/17), 1647-1658.
- DELIBRIAS G., GABERT, J., & JORDA M., 1984** - Données nouvelles sur la chronostratigraphie et l'évolution paléomorphologique postglaciaire des Alpes du Sud (Moyenne Durance). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Mécanique-Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, **299** (6), 263-266.
- EDWARD R.L., BECK J.W., BURR G.S., DONAHUE D.J., CHAPPELL M.A., BLOOM A.L., DRUFFEL E.R.M., & TAYLOR F.W., 1993** - A large drop in atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and reduced melting in the Younger Dryas, documented with ^{230}Th ages of corals. *Science*, **260** (5110), 962-968.
- FAIRBANKS R.G., MORTLOCK R.A., CHIU T.-C., CAO L., KAPLAN A., GUILDERSON T.P., FAIRBANKS T.W., BLOOM A.L., GROOTES P.M., & NADEAU M.-J., 2005** - Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews*, **24** (16/17), 1781-1796.
- FRIEDRICH M., KROMER B., SPURK H., HOFMANN J., & KAISER K.F., 1999** - Paleo-environment and radiocarbon calibration as derived from Lateglacial/Early Holocene tree-ring chronologies. *Quaternary International*, **61** (1), 27-39.
- FRIEDRICH M., KROMER B., KAISER K.F., SPURK M., HUGHEN K.A., & JOHNSEN S.J., 2001** - High-resolution climate signals in the Bölling-Allerød Interstadial (Greenland Interstadial 1) as reflected in European tree-ring chronologies compared to marine varves and ice-core records. *Quaternary Science Reviews*, **20** (11), 1223-1232.
- GAUTIER E., 1992** - *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Büech (Alpes du Sud)*. Thèse de Doctorat, Université Paris X - Nanterre, Nanterre, 439 p.
- GIDON M., MONTJUVENT, G., FLANDRIN, J., MOULLADE, M., DUROZOY, G., & DAMIANI, L., 1991** - Carte géologique de la France à 1/50000 (n°893), Laragne-Montéglin. Notice explicative de la feuille Laragne-Montéglin à 1/50000. BRGM, Orléans, 84 p.
- GOSLAR T., ARNOLD M., TISNÉRAT-LABORDE N., CZERNIK J., WIECKOWSKI K., 2000** - Variations of Younger Dryas atmospheric radiocarbon explicable without ocean circulation changes. *Nature*, **403** (4772), 877-880.
- HOGG A., PALMER J., BOSWIJK G., BRONK RAMSEY C., TURNEY C., MCCORMAC G., & BROWN D., 2009** - Assessment of the integrity of the Southern Hemisphere ^{14}C calibration curve and its extension from AD 785 to 195 BC, with particular emphasis on the interhemispheric offset. In Abstracts for the 20th International Radiocarbon Conference, 31 May - 5 Jun 2009, Kailua-Kona (Hawaii, USA), 6-7.
- HUA Q., BARBETTI M., FINK D., KAISER K.F., FRIEDRICH M., KROMER B., LEVCHENKO V.A., ZOPPI U., SMITH A.M., & BERTUCH F., 2009** - Atmospheric ^{14}C variations derived from tree rings during the early Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*, **28** (25/26), 2982-2990.
- HUGHEN K.A., SOUTHON J.R., LEHMAN S.J., & OVERPECK J.T., 2000** - Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation. *Science*, **290** (5498), 1951-1954.
- HUGHEN K.A., SOUTHON J.R., BERTRAND C.J.H., FRANTZ B., & ZERMENO P., 2004** - Cariaco Basin calibration update:

- revisions to calendar and ^{14}C chronologies for core PL07-58PC. *Radiocarbon*, **46** (3), 1161-1187.
- JORDA M., ROSIQUE T., & ÉVIN J., 2000** - Données nouvelles sur l'âge du dernier maximum glaciaire dans les Alpes méridionales françaises. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Sciences de la Terre et des Planètes*, **331** (3), 187-193.
- KAISER K.F., 1993** - Beiträge zur Klimageschichte vom Hochglazial bis ins frühe Holozän, rekonstruiert mit Jahrringen und Molluskenschalen aus verschiedenen Vereisungsgebieten. Ziegler Druck- und Verlags-AG, Winterthur, 206 p.
- KAISER K.F., FRIEDRICH M., MIRAMONT C., KROMER B., SGIER M., SCHAUB M., BOEREN I., REMMELE S., TALAMO S., GUIBAL F., & SIVAN O., 2010** - Challenging process to make the Late-glacial tree-ring chronologies from Europe absolute - an inventory. *Quaternary Science Reviews*, doi:10.1016/j.quascirev.2010.07.009.
- KROMER B., FRIEDRICH M., HUGHEN K.A., KAISER K.F., REMMELE S., SCHAUB M., & TALAMO S., 2004** - Late Glacial ^{14}C ages from a floating, 1382-ring pine chronology. *Radiocarbon*, **46** (3), 1203-1209.
- LINICK T.W., LONG A., DAMON P.E., & FERGUSON C.W., 1986** - High-precision radiocarbon dating of bristlecone pine from 6554 to 5350 BC. *Radiocarbon*, **28** (2B), 943-53.
- MAGNY M., MIRAMONT C., & SIVAN O., 2002** - Assessment of the impact of climate and anthropogenic factors on Holocene Mediterranean vegetation in Europe on the basis of palaeohydrological records. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **186** (1/2), 47-59.
- MIKOLAJEWICZ U., 1996** - A meltwater induced collapse of the "conveyor belt" thermohaline circulation and its influence on the distribution of D^{14}C and d^{18}O in the oceans. *Max-Planck-Institut für Meteorologie. Report*, **189**, 25 p.
- MIRAMONT C., 1998** - *Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance*. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille I, Aix-en Provence, 286 p.
- MIRAMONT C., SIVAN O., EDOUARD J.-L., JORDA M., & ROSIQUE T., 2000a** - Subfossil trees (*Pinus silvestris* L.) of the Durance basin (Southern Alps, France): environmental changes from Allerød to Atlantic. *Dendrochronologia*, **18**, 83-89.
- MIRAMONT C., SIVAN O., ROSIQUE T., EDOUARD J.-L., & JORDA M., 2000b** - Subfossil trees deposits in the middle Durance (Southern Alps, France). Environmental changes since Allerød to Atlantic. *Radiocarbon*, **42** (3), 423-435.
- MIRAMONT C., ROSIQUE T., SIVAN O., EDOUARD J.-L., MAGNIN F., & TALON B., 2004** - Le cycle de sédimentation «postglaciaire principal» des bassins marneux sub-alpins: état des lieux. *Méditerranée*, **1/2**, 71-84.
- MIRAMONT C., BOUTTERIN C., SIVAN O., BRUNETON H., & MANTRAN M., 2008** - Grandes séquences et principales ruptures morphogéniques en Haute Provence. Les complexes sédimentaires des petits organismes torrentiels de Moyenne Durance. *Collection EDYTEM. Cahiers de Géographie*, **2008**, 145-154.
- MUNAUTA.-V., 1979** - La dendrochronologie. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **16** (1/2), 65-74.
- MUSCHELER R., BEER J., WAGNER G., & FINKEL R.C., 2000** - Changes in deep-water formation during the Younger Dryas event inferred from ^{10}Be and ^{14}C records. *Nature*, **408** (6812), 567-570.
- PEARSON G.W., & STUIVER M., 1993** - High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale 500-2500 BC. *Radiocarbon*, **35** (1), 25-33.
- PEARSON G.W., BECKER B., & QUA F., 1993** - High-precision ^{14}C measurement of German and Irish oaks to show the natural ^{14}C variations from 7890 to 5000 BC. *Radiocarbon*, **35** (1), 93-104.
- REIMER P.J., HUGHEN K.A., GUILDERTSON T.P., MCCORMAC G., BAILLIE M.G.L., BARD E., BARRATT P., BECK J.W., BUCK C.E., DAMON P.E., FRIEDRICH M., KROMER B., RAMSEY C.B., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J.R., STUIVER M., & VAN DER PLICHT, J., 2002** - Preliminary report of the first workshop of the IntCal04 radiocarbon calibration/comparison working group. *Radiocarbon*, **44** (3), 653-61.
- REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BERTRAND C.J.H., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G.S., CUTLER K.B., DAMON P.E., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GUILDERTSON T.P., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., MANNING S., RAMSEY C.B., 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.
- REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.G., BRONK RAMSEY C., BUCK C.E., BURR G.S., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERTSON T.P., HAJDAS I., HEATON T.J., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAISER K.F., KROMER B., MCCORMAC F.G., MANNING S., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SOUTHON J.R., TALAMO S., TURNEY C.S.M., VAN DER PLICHT J., & WEYHENMEYER C.E., 2010** - IntCal09 and MARINE09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **51** (4), 1111-1150.
- RINN F., 2005** - *TSAP - Time Series Analyses and presentation dendrochronology and related applications*. Franck Rinn, Heidelberg, 91 p.
- ROSIQUE T., 1994** - Les gisements de bois fossiles conservés dans les formations détritiques tardi- et postglaciaires du bassin du Buëch (Hautes Alpes): interprétation géodynamique et paléocéologique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Sciences de la Terre et des Planètes*, **319** (3), 373-380.
- ROSIQUE T., 1996** - *Morphogenèse et évolution des paléoenvironnements alpins de la fin des temps glaciaires au début de l'Holocène: l'exemple de la Moyenne Durance (Alpes françaises du Sud)*. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille I, Aix-en-Provence, 288 p.
- ROUSSET C., & GUIOMAR M., 1999** - Le début de la torréntialité dans le bassin versant de la Fontarasse, près de Barles (Alpes de Haute-Provence, France), marqueur d'une rupture climatique de l'Holocène ancien. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Sciences de la Terre et des Planètes*, **328** (8), 541-546.
- SCHAUB M., KAISER K.F., KROMER B., & TALAMO S., 2005** - Extension of the Swiss Lateglacial tree-ring chronologies. *Dendrochronologia*, **23**, 11-18.
- SCHAUB M., 2007** - Lateglacial environmental conditions on the Swiss Plateau. A multi-proxy approach using tree rings and sediment-based proxies. *Physische Geographie*, **54**, 1-164.
- SCHAUB M., KAISER K.F., FRANK D.C., BUENTGEN U., KROMER B., & TALAMO S., 2008a** - Environmental change during the Allerød and Younger Dryas reconstructed from tree-ring data. *Boreas*, **37** (1), 74-86.
- SCHAUB M., BUNTGEN U., KAISER K.F., KROMER B., TALAMO S., ANDERSEN K.K., & RASMUSSEN S.O., 2008b** - Lateglacial environmental variability from Swiss tree rings. *Quaternary Science Reviews*, **27** (1/2), 29-41.
- SIVAN O., 2002** - *Activité érosive et évolution des paléoenvironnements alpins postglaciaires. Etude dendrogéomorphologique des gisements de troncs subfossiles dans les Alpes du Sud*. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille I, Aix-en-Provence, 241p.
- SIVAN O., MIRAMONT C., & EDOUARD J.-L., 2006** - Rythmes de la sédimentation et interprétations paléoclimatiques lors du Postglaciaire dans les Alpes du Sud. ^{14}C et dendro-géomorphologie, deux chronomètres complémentaires. In P. Allée & L. Lespez (eds.), *L'érosion entre société, Climat et Paléoenvironnement. Table ronde de Clermont-Ferrand en l'honneur de R. Neboit-Guilhot (25-27 mars 2004)*. Presses universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 423-428.
- SIVAN O., & MIRAMONT C., 2008** - Les variations temporelles et spatiales de la morphogenèse postglaciaire des fonds de vallons sud-alpins. L'exemple du bassin versant du Drouzet (Hautes-Alpes; France). *Quaternaire*, **19** (3), 229-238.
- SIVAN O., & MIRAMONT C.,** sous presse - L'homme face aux fluctuations climatiques depuis la dernière glaciation dans les Alpes du Sud (Moyenne Durance, Alpes-Maritimes). Quels impacts sur les sociétés? In INRAP, Météo-France & Cité des Sciences (eds.), *Actes du colloque « Des climats et des hommes », Paris, 19-29-21 novembre 2009*. INRAP - La Découverte, Paris.
- SNOWBALL I., & SANDGREN P., 2002** - Geomagnetic field variations in northern Sweden during the Holocene quantified from varved lake sediments and their implications for cosmogenic nuclide production rates. *The Holocene*, **12** (5), 517-530.
- STOCKER T.F., & WRIGHT D.G., 1996** - Rapid changes in ocean circulation and atmospheric radiocarbon. *Paleoceanography*, **11** (6), 773-795.
- ST-ONGE G., STONER J.S., & HILLAIRE-MARCEL C., 2003** - Holocene paleomagnetic records from the St. Lawrence Estuary, eastern Canada: centennial- to millennial-scale geomagnetic modulation of cosmogenic isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, **209** (1/2), 113-130.
- STUIVER M., 1961** - Variations in radiocarbon concentration and sunspot activity. *Journal of Geophysical Research*, **66** (1), 273-276.
- STUIVER M., & QUAY P.D., 1980** - Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable Sun. *Science*, **207** (4426), 11-19.

- STUIVER M., & PEARSON G.W., 1993** - High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC and 2500-6000 BC. *Radiocarbon*, **35** (1), 1-23.
- STUIVER M., & BECKER B., 1993** - High-precision calibration of the radiocarbon time scale AD 1950-6000 BC. *Radiocarbon*, **35** (1), 35- 65.
- STUIVER M., & BRAZIUNAS T.F., 1993** - Modeling atmospheric ¹⁴C influences and ¹⁴C ages of marine samples back to 10,000 BC. *Radiocarbon*, **35** (1), 137-189.
- STUIVER M., REIMER P.J., BARD E., BECK J.W, BURR G.S., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., VAN DER PLICHT J., & SPURK M. 1998a** - INTCAL98 Radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40** (3), 1041-1083.
- STUIVER M., REIMER P.J., BRAZIUNAS T.F., 1998b** - High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, **40** (3), 1127-1151.