



HAL
open science

Panorama de la Dendrochronologie en France.

Laurent Astrade, Cécile Miramont

► **To cite this version:**

Laurent Astrade, Cécile Miramont (Dir.). Panorama de la Dendrochronologie en France.. Coordinateurs: Laurent Astrade; Miramont, Cécile. Collection EDYTEM, pp.226, 2010, Collection Edytem, n° 11, 978-2-918435-03-7. halsde-00786410

HAL Id: halsde-00786410

<https://hal.science/halsde-00786410>

Submitted on 8 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Collection EDYTEM

Numéro 11 - Année 2010

Coordination :
Laurent Astrade
Cécile Miramont

PANORAMA de la DENDROCHRONOLOGIE en FRANCE



Numéro 11 - Année 2010

Panorama de la dendrochronologie en France

*Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France »
8, 9 et 10 octobre 2009, Digne-les-Bains, Alpes de Haute Provence*

Coordination de l'ouvrage : Laurent Astrade et Cécile Miramont



Comité éditorial de la Collection EDYTEM : Laurent ASTRADE (dir.), Jean-Jacques DELANNOY, Philip DELINE, Mélanie DUVAL-MASSALOUX, Marc DZIKOWSKI, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, André PAILLET, Yves PERRETTE, Véronique PEYRACHE-GADEAU, Magali ROSSI, Georges-Marie SAULNIER.

Comité de rédaction du présent numéro : Laurent ASTRADE, Cécile MIRAMONT.

Comité de lecture du présent numéro : Laurent ASTRADE, Christelle BELINGARD (DTalents, CNRS Géolab, CNRS), Vincent BERNARD (CNRS, CReAAH), André BILLAMBOZ (Landesamt für Denkmalpflege), Henri CUNY (INRA ENGREF, CNRS LERFoB), Jean-Louis EDOUARD (CNRS MMSH), Olivier GIRARDCLOS (CNRS ChronoEnvironnement), Frédéric GUIBAL (CNRS IMEP), Georges-Noël LAMBERT (CNRS ChronoEnvironnement), François LEBOURGEOIS (INRA ENGREF, CNRS LERFoB), Blandine LECOMTE-SCHMITT (INRAP, Centre-Ile-de-France), Jérôme LOPEZ SAEZ (Cemagref), Pierre MÉRIAN (INRA ENGREF, CNRS LERFoB), Cécile MIRAMONT (CNRS IMEP, Université de Provence), Jean-Charles OILLIC (CNRS CReAAH), Mélanie SAULNIER (CNRS IMEP).

Mise en page : André PAILLET.

Les personnes ci-dessus, citées sans indication de structure d'appartenance, sont membres du laboratoire EDYTEM.

NB : Les points de vue et conclusions développés dans les articles n'engagent que leurs auteurs.

La publication de ce volume a bénéficié des soutiens financiers suivants :

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie / CNRS, Le Bourget-du-Lac
Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie (IMEP), CNRS, Aix-en-Provence
Laboratoire ChronoEnvironnement, CNRS, Besançon
Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire (CReAAH), CNRS, Rennes
Centre Camille Jullian, Archéologie méditerranéenne et Africaine, Aix-en-Provence
Fédération de Recherche CNRS ECCOREV, Aix en Provence
Université de Provence, Aix-en-Provence

Imprimé par : Pure Impression, 451, rue de la Mourre, Zac Fréjorgues Est, F 34130 Mauguio.

Exemplaires disponibles au Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Campus scientifique,
Bâtiment Pôle Montagne, F 73 376 Le Bourget-du-Lac Cedex, ou auprès de : sec-edytem@univ-savoie.fr

Site web du laboratoire : <http://edytem.univ-savoie.fr/>

On trouvera à la fin de cet ouvrage la présentation de l'ensemble des publications du Laboratoire EDYTEM

Dépôt légal : octobre 2010

ISSN : 1762-4304 - ISBN : 978-2-918435-03-7 - EAN : 9782918435037

Éditorial

Ce nouveau numéro de la Collection Edytem accueille les contributions du colloque qui s'est déroulé, il y a moins d'un an, à Digne-les-Bains, autour de la dendrochronologie en France. C'est un honneur pour la Collection Edytem de se faire l'écho de ce colloque qui a su réunir l'ensemble des communautés scientifiques travaillant et s'appuyant en France sur la dendrochronologie. Faire rencontrer les différentes communautés, partager les nouveaux outils combinant la haute résolution et les données environnementales *s.l.*, porter à connaissance les différentes applications actuelles sont quelques uns des défis que s'étaient imposés les organisateurs de cette réunion.

Au regard du nombre de participants, des structures de recherche présentes à Digne-les-Bains et du contenu des contributions, on peut affirmer que ce colloque a pleinement atteint ses objectifs. Le plus important d'entre eux est assurément d'avoir fait se rencontrer, en un même lieu et au même moment, les spécialistes issus des champs de l'archéologie, des sciences de l'environnement et des géosciences.

Il y aura assurément un avant et un après Digne-les-Bains 2009 ! Ce numéro se veut un témoin pour marquer cet événement mais aussi un relais pour construire ce que devra être la dendrochronologie française de demain : une « science » qui, autour d'un même objet, la lecture des informations inscrites dans les cernes d'arbre, se devra d'irriguer les sciences de l'homme et de l'environnement qui sont de plus en plus impliquées ensemble pour appréhender les évolutions passées, récentes et actuelles des milieux et des territoires.

Les différents textes de ce numéro et leur articulation en cinq grands thèmes (dendroécologie, dendroclimatologie, dendrogéomorphologie, dendroarchéologie, méthodes de la dendrochronologie) mettent en avant la diversité des applications et l'apport de cette approche dans les questionnements actuels sur la biodiversité, la part de l'homme et du climat dans l'évolution environnementale, la récurrence et l'importance de certains risques, etc. Les contributions contenues dans ce numéro ainsi que les résumés des communications soulignent, si besoin est, l'intérêt de faire parler les différentes disciplines travaillant sur des problématiques différentes tout en travaillant sur de mêmes supports.

La dendrochronologie, par ce colloque, fait partie de ces démarches pionnières pour construire une interdisciplinarité riche et à même de répondre à la complexité des environnements passés, récents et actuels à laquelle sont confrontés aussi bien les chercheurs, les gestionnaires et les acteurs de terrain. Cette volonté des organisateurs d'inscrire tant le colloque de Digne-les-Bains que ce numéro dans cette dynamique interdisciplinaire où beaucoup reste à faire et à construire est à saluer. Je remercie les organisateurs du colloque et les coordinateurs de ce numéro de la confiance qu'ils ont accordée à la Collection Edytem pour être leur porte parole.

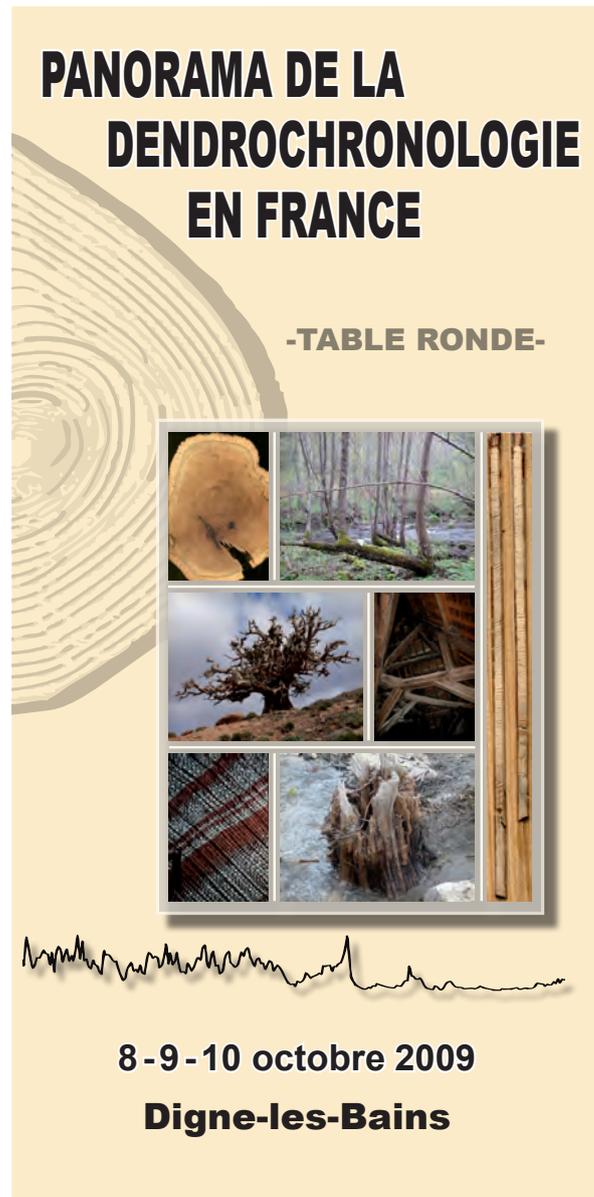
Jean-Jacques DELANNOY
Directeur du laboratoire EDYTEM

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Éditorial, par JEAN-JACQUES DELANNOY | 3 |
| À propos du colloque | 6 |
| Avant-propos, par LAURENT ASTRADE et CÉCILE MIRAMONT | 9 |
| Introduction scientifique, La dendrochronologie : retour vers le passé, par LUCIEN TESSIER | 13 |
| DENDROÉCOLOGIE | 19 |
| Sensibilité des écosystèmes forestiers tempérés français à la variabilité climatique et aux événements extrêmes : exemple du réseau RENECOFOR, par FRANÇOIS LEBOURGEOIS, CYRILLE B.K. RATHGEBER, PIERRE MÉRIAN, ERWIN ULRICH | 21 |
| Influence du statut social des arbres sur la dynamique intra-annuelle de la formation du bois, par CYRILLE B.K. RATHGEBER | 29 |
| Déterminisme climatique des années de croissance extrême chez le chêne sessile dans la moitié nord de la France, par PIERRE MÉRIAN, JEAN-DANIEL BONTEMPS, LAURENT BERGÈS, FRANÇOIS LEBOURGEOIS | 39 |
| Arboretum et dendroécologie : dépérissement du cèdre, par LAURA NIEDERLENDER, VINCENT BADEAU | 47 |
| Dynamique intra-annuelle de la formation du bois de trois espèces de conifères (Épicéa commun, Pin sylvestre et Sapin pectiné) dans les Vosges, par HENRI CUNY, CYRILLE RATHGEBER, MERIEM FOURNIER | 55 |
| Résumés des autres communications | 65 |
| DENDROCLIMATOLOGIE | 67 |
| Reconstruction des températures estivales dans les alpes françaises au moyen de données dendrochronologiques (749-2008 AD), par CHRISTOPHE CORONA, JEAN-LOUIS EDOUARD, FRÉDÉRIC GUIBAL, JOËL GUIOT, SYLVAIN BERNARD, ANDRÉ THOMAS, NICOLE DENELLE | 69 |
| Étude de la relation entre la croissance du Pin cembro et le climat dans les Alpes Françaises depuis 500 ans, par MÉLANIE SAULNIER, JEAN-LOUIS EDOUARD, CHRISTOPHE CORONA, FRÉDÉRIC GUIBAL | 77 |
| Résumés des autres communications | 87 |
| DENDROGÉOMORPHOLOGIE | 89 |
| L'histoire des dangers naturels se lit dans les cernes des arbres, par MARKUS STOFFEL | 91 |
| Reconstitution dendrogéomorphologique d'événements de lave torrentielle à l'aide de feuillus blessés, par ESTELLE ARBELLAY, MARKUS STOFFEL, MICHELLE BOLLSCHWEILER | 99 |
| Apport de la dendrogéomorphologie pour la reconstruction spatio-temporelle des avalanches. L'exemple du dépôt avalancheux Pierres Jean Jeanne (Massif de l'Oisans, France), par CHRISTOPHE CORONA, GEORGES ROVERA, JÉRÔME LOPEZ SAEZ, MARKUS STOFFEL, PASCAL PERFETTINI | 109 |

| | |
|---|------------|
| Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales, par CAROLINE ZANETTI, FRÉDÉRIC GUIBAL, MAXIME BRUGIER, MICHEL VENNETIER, PATRICE MÉRIAUX, MIREILLE PROVANSAL | 117 |
| Le couvert forestier, marqueur spatio temporel de l'activité d'un glissement de terrain, par JÉRÔME LOPEZ SAEZ, LAURENT ASTRADE, CHRISTOPHE CORONA, MARKUS STOFFEL, FRÉDÉRIC BERGER, PHILIPPE SCHOENEICH | 125 |
| Dendrochronologie en ripisylve. Des cernes aux changements hydromorphologiques dans les systèmes fluviaux, par LAURENT ASTRADE, SIMON DUFOUR | 131 |
| Résumés des autres communications | 141 |
| DENDROARCHÉOLOGIE | 143 |
| Dendrochronologie des charpentes et plafonds peints médiévaux en région méditerranéenne par FRÉDÉRIC GUIBAL, EMILIE BOUTICOURT | 145 |
| Exploitation à visée archéo-environnementale des patrons de croissance des bois prélevés pour la datation du bâti. Le cas des châtaigniers de la grange ovale de Saint-Eloy-les-Tuileries, Corrèze, par CHRISTELLE BELINGARD, SANDRINE PARADIS-GRENOUILLET, ROMAIN ROUAUD, PHILIPPE ALLEE | 151 |
| Arbres non forestiers et dendrologie. Apports de l'étude de jeunes branchages archéologiques du nord de la France, par ANNE DIETRICH, BLANDINE LECOMTE-SCHMITT | 159 |
| Datation dendrochronologique du bâti traditionnel et occupation humaine dans les Alpes françaises du Sud, au cours du dernier millénaire, par JEAN-LOUIS ÉDOUARD | 169 |
| Résumés des autres communications | 177 |
| MÉTHODES | 179 |
| L'apport des séries dendrochronologiques françaises au prolongement de la chronologie européenne absolue et à la calibration du radiocarbone, par CÉCILE MIRAMONT, FRÉDÉRIC GUIBAL, KLAUS FÉLIX KAISER, BERND KROMER, MARIO SGIER, OLIVIER SIVAN, MICHAEL FRIEDRICH, SAHRA TALAMO | 181 |
| L'utilisation de la resistographie en dendrogéomorphologie. Retour d'expériences, par JÉRÔME LOPEZ SAEZ, CHRISTOPHE CORONA, FRÉDÉRIC BERGER, MARKUS STOFFEL | 191 |
| AnthracoloJ : un outil pour la simplification des mesures dendrométriques, par SANDRINE PARADIS-GRENOUILLET, JEAN-PHILIPPE LELEU, CHRISTELLE BELINGARD, ROMAIN ROUAUD, PHILIPPE ALLEE | 199 |
| Dendrochronologie et dendroclimatologie du chêne en France. Questions posées par le transfert de données de bois historiques vers la dendroclimatologie, par GEORGES LAMBERT, VINCENT BERNARD, JEAN-LUC DUPOUEY, PASCALE FRAITURE, PATRICK GASSMANN, OLIVIER GIRARD CLOS, FRANÇOIS LEBOURGEOIS, YANNICK LEDIGOL, CHRISTOPHE PERRAULT, WILLY TEGEL | 205 |
| Résumés des autres communications | 217 |

À propos du colloque de Digne-les-Bains



Les textes qui composent ce volume sont issus du colloque « *Panorama de la dendrochronologie en France* » qui s'est tenu les 8, 9 et 10 octobre 2009 à Digne-les-Bains.

Les diaporamas des communications du colloque sont accessibles à l'adresse : <http://edytem.univ-savoie.fr/dendrofrance>

Partenaires et financeurs du colloque

Réserve Géologique de Haute-Provence, Digne-les-Bains
IUT de Provence, Digne-les-Bains
Laboratoire EDYTEM, CNRS, Le Bourget-du-Lac
Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, CNRS, Aix-en-Provence
Laboratoire ChronoEnvironnement, CNRS, Besançon
Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire, CNRS, Rennes
Université de Provence, Aix-en-Provence
Fédération de Recherche CNRS ECCOREV, Aix en Provence

Comité d'organisation

ALPE Yves, IUT de Provence, Rés. Géologique Hte-Provence,
Digne-les-Bains, yves.alpe@univ-provence.fr

ALVITRE Maryse, CNRS IMEP, Aix-en-Provence,
maryse.alvitre@univ-cezanne.fr

ASTRADE Laurent, CNRS EDYTEM, Université de Savoie, Chambéry,
laurent.astrade@univ-savoie.fr

BELINGARD Christelle, DTalents, Limoges ; CNRS Géolab, CNRS, Clermont-Ferrand, christelle.belingard@orange.fr

BERNARD Vincent, CNRS CReAAH, Rennes, vincent.bernard@univ-rennes1.fr

DUPOUEY Jean-Luc, INRA EEF, Champenoux, dupouey@nancy.inra.fr

EDOUARD Jean-Louis, CNRS CCJ, Aix-en-Provence, jean-louis.edouard@univ-cezanne.fr

GIRARDCLOS Olivier, CNRS ChronoEnvironnement, Besançon, olivier.girardclos@univ-fcomte.fr

GUIBAL Frédéric, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, frederic.guibal@univ.u-3mrs.fr

GUIOMAR Myette, Rés. Géologique Hte-Provence, Digne-les-Bains, m.guomar@resgeol04.org

LAMBERT Georges-Noël, CNRS ChronoEnvironnement, Besançon, joellamb@club-internet.fr

MIRAMONT Cécile, CNRS IMEP, Université de Provence, Aix-en-Provence, cecile.miramont@univ-provence.fr

Liste des participants au colloque

ANDRIEUX Emilie, INRA Dynafor, Toulouse, Emile.Andrieu@toulouse.inra.fr

ALVITRE Maryse, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, maryse.alvitre@univ-cezanne.fr

ARBELLAY Estelle, Laboratory for Dendrogeomorphology, Université de Berne, Suisse, estelle.arbellay@dendrolab.ch

BADEAU Vincent, INRA EEF, Champenoux, vincent.badeau@nancy.inra.fr

BILLAMBOZ André, Landesamt für Denkmalpflege, Baden-Württemberg, Allemagne, Andre.Billamboz@rps.bwl.de

BURNEL Laurent, INRA Dynafor, Toulouse, laurent.burnel@toulouse.inra.fr

CAILLERET Maxime, INRA URFM, Avignon, maxime.cailleret@avignon.inra.fr

CORONA Christophe, Cémagref Grenoble, christophe.corona@cemagref.fr

CREST Yannick, Université de Provence, Aix-en-Provence, yannick.crest@free.fr

CUNY Henri, INRA ENGREF, CNRS LERFoB, Champenoux, henri.cuny@nancy.inra.fr

DAUX-MERCIER Valérie, CNRS CEA LSCE, Gif sur Yvette, valerie.daux@lsce.ipsl.fr

DENELLE Nicole, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, nicole.denelle@univ-cezanne.fr

FRAITURE Pascale, Université de Liège, Belgique, Laboratoire de dendrochronologie, pascale.fraiture@kikirpa.be

GADBIN-HENRY Claude, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, Université Paul Cezanne, claudegadhen@yahoo.fr

GENTY Dominique, CNRS CEA LSCE, Gif sur Yvette, dominique.genty@lsce.ipsl.fr

GUIN Ophélie, CNRS CEA LSCE, Gif sur Yvette, Ophelie.Guin@lsce.ipsl.fr

GUITTON Véronique, INRAP, CNRS CReAAH, Rennes, veronique.guitton@inrap.fr

HUNOT Jean-Yves, Conseil général Maine-et-Loire, Angers, d.boivin@cg49.fr

JOMELLI Vincent, CNRS Laboratoire de Géographie Physique, Meudon, jomelli@cnrs-belleuve.fr

LE DIGOL Yannick, Dendrotech, Rennes, yannick.ledigol@dendrotech.fr

LEBOURGEOIS François, INRA ENGREF, CNRS LERFoB, Champenoux, lebourgeois@engref.fr

LECOMTE-SCHMITT Blandine, INRAP, Centre-Ile-de-France, La Courneuve, blandine.lecomte-schmitt@inrap.fr

LEROY Melaine, CNRS EDYTEM, Chambéry, melaine.leroy@univ-savoie.fr

LOPEZ SAEZ Jérôme, Cémagref, Grenoble, jerome.lopez@cemagref.fr
MARIOTTE Nicolas, INRA Avignon, mariotte@avignon.inra.fr
MÉRIAN Pierre, INRA ENGREF, CNRS LERFoB, Champenoux, Pierre.merian@engref.agroparistech.fr
MILLE Pierre, INRAP, p.mille.bois@wanadoo.fr
NIEDERLENDER Laura, INRA EEF, Champenoux, lniederlender@hotmail.fr
PAILLET André, CNRS EDYTEM, Université de Savoie, Chambéry, andre.paillet@univ-savoie.fr
PARADIS Sandrine, CNRS Géoloab, Limoges, s.paradis@wanadoo.fr
PAVLOVA Irina, CNRS Laboratoire de Géographie Physique, Meudon, Irina.Pavlova@cnrs-bellevue.fr
PEIFFER Marianne, INRA ENGREF, CNRS LERFoB, Champenoux, peiffer@nancy.inra.fr
PIERRE Monique, CNRS CEA LSCE, Gif sur Yvette, monique.pierre@lsce.ipsl.fr
RATHGEBER Cyrille, INRA ENGREF, CNRS LERFoB, Champenoux, cyrille.rathgeber@nancy.inra.fr
ROUZEAU Nicolas, DRAC PACA, nicolas.rouzeau@culture.gouv.fr
SAULNIER Mélanie, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, melanie.saulnier@etu.univ-cezanne.fr
SCHOEINEICH Philippe, CNRS PACTE, IGA Université Grenoble I, Grenoble, Philippe.Schoeneich@ujf-grenoble.fr
SILVA Daniel, INRA EEF, Champenoux,, esilva@nancy.inra.fr
STIEVENARD Michel, CNRS CEA LSCE, Gif sur Yvette, michel.stievenard@lsce.ipsl.fr
STOFFEL Markus, Laboratory for Dendrogeomorphology, Université de Berne, Suisse, markus.stoffel@dendrolab.ch
TESSIER Lucien, retraité, CNRS IMEP, Aix-en-Provence
THOMAS André, CNRS IMEP, Aix-en-Provence, andre.thomas@univ-cezanne.fr
WEITZ Armelle, Université Paris I, armelle.weitz@gmail.com
ZANETTI Caroline, Cemagref, CNRS CEREGE, Aix-en-Provence cedex, caroline.zanetti@cemagref.fr
ZRIBI Lobna, INRGREF, Tunis, Tunisie, lobna_zribi@yahoo.fr



Les participants au colloque lors de la visite du Musée de la Réserve naturelle géologique de Haute-Provence (Digne-les-Bains).

Avant-propos

Du 8 au 10 octobre 2009, s'est déroulé à Digne-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence) le colloque « Panorama de la dendrochronologie en France ». Ce colloque a eu lieu dans les locaux de l'IUT de Digne-les-Bains (Université de Provence) avec le soutien logistique de la Réserve Géologique de Haute-Provence et les aides financières de laboratoires du CNRS (EDYTEM, IMEP, Chronoenvironnement, CReAHH), de l'université de Provence, de la fédération de recherche Eccorev et de la Maison Méditerranéenne des Sciences de l'Homme.

La dendrochronologie est une méthode basée sur l'analyse des cernes annuels de croissance des arbres, utilisée par différentes disciplines pour répondre à diverses problématiques liées à l'homme et à l'environnement. Ainsi, la lecture des cernes permet, par exemple, à l'archéologue de dater des bois retrouvés sur ses sites de fouilles (barque, pieux) et à l'historien de suivre la vie d'un bâtiment ou d'une œuvre (charpente, tableau), au paléoenvironmentaliste de retracer l'évolution d'un paysage (trunks subfossiles), à l'écologue et au forestier de connaître les facteurs de croissance ou de dépérissement des arbres et les effets du changement climatique actuel, au climatologue de reconstituer les climat du passé, au géomorphologue d'évaluer les risques naturels (crues torrentielles, avalanches, glissements de terrain), etc. La dendrochronologie, à la fois méthode et objet de recherche à part entière, se subdivise ainsi en dendro-archéologie, dendro-écologie, dendro-climatologie, dendro-géomorphologie.

Les utilisateurs des séries de cernes de croissance sont donc nombreux, mais dispersés dans différents champs d'application : historiquement utilisée pour l'archéologie et la calibration du radiocarbone, pour la gestion forestière, elle a été prise en main par l'écologie, la physiologie, puis par la climatologie et la statistique, l'étude des paléoenvironnements, des paléoclimats, et enfin la géomorphologie et l'hydrologie. Tous penchés sur un objet similaire, les chercheurs de ces disciplines ont le plus souvent travaillé en parallèle, sans croiser leurs problématiques, ne se retrouvant que sur les questions méthodologiques d'interdatation et sur la construction de série de références.

Cette constatation est venue au fil de discussions entre certains dendrochronologues. C'est alors qu'est née l'idée d'organiser une rencontre à l'échelle nationale, à l'image de ce qui existe déjà au niveau international et européen (Eurodendro). Des chercheurs ont été sollicités et sont venus concrétiser la pluridisciplinarité du comité d'organisation de ce « panorama de la dendrochronologie en France ».

L'objectif de ce colloque était donc de donner aux chercheurs, enseignants-chercheurs, professionnels et étudiants qui travaillent sur les séries de cernes de croissance des arbres les conditions propices à une rencontre pour échanger leurs savoir-faire, développer des partenariats et des collaborations scientifiques, communiquer et valoriser leurs recherches. Il s'agissait d'élargir la communauté des dendrochronologues en France tout en renforçant son identification, par la précision de ses champs d'application, pour donner à la communauté scientifique et au public une image claire de la dendrochronologie. En cela, cette manifestation représente la première rencontre sur ce thème à l'échelle nationale.

Plusieurs temps forts ont marqués ce colloque :

- la conférence grand public : la veille du colloque a eu lieu, dans le cadre des conférences de l'IUT de Digne, la conférence « Voyage au cœur de l'arbre : le climat, le paysage et l'homme racontés par les cernes », présentée par Laurent Astrade, Vincent Bernard, Christophe Corona, Frédéric Guibal, Georges-Noël Lambert et Cécile Miramont. Cette manifestation a été une réussite et a connu une participation record ;
- l'exposition de bois : pendant le colloque, des bois remarquables (rondelles de bois anciens, bois fossiles, poutres) issus de la collection de Jean-Louis Edouard ont été exposés ;
- l'introduction du colloque : Lucien Tessier, chercheur retraité, invité comme grand témoin, a retracé l'histoire de la dendrochronologie dans le monde et en France. Il a manifesté son émotion devant l'auditoire en rappelant que « *cette large réunion de dendrochronologues français était la première jamais réalisée* » et, qu'à ce titre, « *cet automne 2009 sera une date clé dans l'histoire de la dendrochronologie en France* » ;
- la présentation des travaux : 31 communications de grande qualité ont été présentées, regroupant au total 72 auteurs différents. Ces communications ont été regroupées en 5 sessions : Dendroécologie, Dendroclimatologie, Dendrogéomorphologie, Dendroarchéologie, Méthodes ;
- la visite de la maison de la Réserve Géologique de Haute-Provence : à l'invitation de son Président, les participants au colloque ont visité le musée-promenade et ont été conviés à un apéritif de bienvenue. Ce fut un moment de grande convivialité pendant lequel les échanges se sont prolongés ;
- l'excursion : les discussions se sont poursuivies pendant l'excursion ensoleillée proposée par Myette Guiomar, au pied de la dalle à ammonites de Digne, et Cécile Miramont, sur ses terrains de recherche, autour des bois subfossiles des torrents de la montagne de Saint-Genis (moyenne Durance).

Le colloque a entièrement atteint ses objectifs en permettant la rencontre entre une soixantaine de chercheurs représentant quasiment l'ensemble des laboratoires, institutions et bureaux d'études travaillant en dendrochronologie en France. Il a permis de montrer qu'au delà du seul outil, la dendrochronologie regroupe de nombreuses disciplines, affiche des problématiques variées et touche des enjeux sociétaux importants (changements climatiques, biodiversité, patrimoine, risques naturels, etc). Dans un certain sens il a même dépassé les attentes en donnant à une communauté une identité au sein de la recherche nationale et internationale. La visibilité et la vie à long terme de cette communauté sont des désirs unanimes qui sont ressortis des discussions de fin de colloque. Des réflexions ont été lancées autour de la façon de matérialiser et de pérenniser cette communauté et ce réseau de chercheurs.

Cet ouvrage rassemble les actes du colloque que les organisateurs ont voulu rendre public dans des délais les plus brefs. L'introduction générale de LUCIEN TESSIER propose une rétrospective sur la discipline et ses principales évolutions thématiques et méthodologiques depuis le XV^e siècle. Les travaux de recherches, fondamentales et appliquées, de la communauté des dendrochronologues couvrent quatre principales thématiques auxquelles s'ajoute un volet méthodologique transversal. C'est ainsi qu'ont été organisées les sessions des journées de communication et que sont présentés les articles de ce volume.

Les cinq premiers articles s'articulent autour du thème de la dendroécologie et abordent les facteurs influençant la croissance des arbres. FRANÇOIS LEBOURGEOIS *et al.* montrent comment évaluer les conséquences des variations climatiques extrêmes (sécheresses, températures) sur la croissance de différentes espèces de feuillus et de résineux dans des conditions écologiques différentes à l'échelle du territoire français (réseau RENECOFOR). A partir d'une plantation de sapins pectinées en Lorraine, CYRILLE RATHGEBER étudie le rôle du statut social des arbres (dominant, dominé et « étouffés ») sur le calendrier de formation du bois et l'intensité de l'activité cambiale. Pour la moitié Nord de la France, PIERRE MERIAN *et al.* expliquent le déterminisme climatique et en particulier l'influence de la sécheresse estivale sur la variabilité spatiale et temporelle de la croissance du chêne sessile, espèce qui constitue l'une des 3 principales essences forestières de plaine. LAURA NIEDERLENDER et VINCENT BADEAU proposent un bilan des forts taux de mortalité qui ont frappé les cèdres de différents arboretums et discutent des différentes causalités (impact du climat, des conditions pédologiques, de la sylviculture). HENRY CUNY *et al.* étudient, pour l'année 2007, la dynamique saisonnière de la formation du bois de trois espèces de conifères (Epicéa commun, Pin sylvestre et Sapin pectiné) dans les Vosges du nord à partir de microcarottes et montrent l'importance des facteurs environnementaux.

L'étude du climat au travers des cernes d'arbres (dendroclimatologie) est illustrée par deux articles. CHRISTOPHE CORONA *et al.*, proposent une reconstruction des températures estivales dans les Alpes françaises pour la période 749-2007 AD à partir d'un réseau de 73 chronologies pluri-centenaires. Les auteurs montrent l'originalité de la région méridionale et occidentale de la chaîne alpine sous influence des régimes climatiques méditerranéens et océaniques. Pour la même zone géographique, MÉLANIE SAULNIER *et al.* dressent un tableau de la relation entre le climat, et en particulier ses variations climatiques extrêmes au cours des cinq derniers siècles, et la croissance du Pin cembro.

Six articles présentent des exemples d'études sur les relations entre la croissance des arbres et les processus d'érosion et de morphogénèse (dendrogéomorphologie). Au travers de divers exemples, MARKUS STOFFEL propose un inventaire des champs d'application de la dendrogéomorphologie à la datation des événements passés et à l'étude des processus actuels : reconstitution de la fréquence, de l'étendue dans l'espace et de l'intensité de différents types d'événements morphogéniques tels que les glissements de terrains, crues, avalanches, etc. La contribution de ESTELLE ARBELLAY *et al.* propose, pour la première fois, d'utiliser les blessures des feuillus pour reconstituer une chronologie des laves torrentielles dans les Alpes suisses. A partir des perturbations de croissance (réduction de croissance, présence de tissu calleux, de bois de réaction, de lignes tangentielles de canaux résinifères), CHRISTOPHE CORONA *et al.* reconstituent les périodes de retour et l'extension spatiale des avalanches dans massif de l'Oisans. Le bois de réaction et l'asymétrie des cernes de croissance permettent à JÉRÔME LOPES SAEZ *et al.*, de définir l'activité d'un glissement de terrain dans la région de Barcelonnette. Deux articles proposent enfin des applications de la dendrogéomorphologie en milieux fluviaux. CAROLINE ZANETTI *et al.* montrent l'importance de l'étude du système racinaire des arbres implantés sur les digues en terme de gestion des ouvrages hydrauliques. LAURENT ASTRADE et SIMON DUFOUR dressent un tableau des différentes utilisations des cernes des arbres situés dans les espaces de ripisylve pour la reconstitution à haute résolution des événements extrêmes et des évolutions hydromorphologiques à long terme (crue, inondation, abaissement de nappe, érosion, sédimentation).

La thématique de la dendroarchéologie est représentée dans quatre contributions. A partir de bois du XV^e et XVI^e siècles récoltés lors d'une opération de préservation et de restauration d'une grange en Corrèze, CHRISTELLE BELINGARD

et al. discutent du potentiel archéo-environnemental des bois échantillonnés pour la datation des édifices anciens. ANNE DIETRICH et BLANDINE LECOMTE-SCHMITT montrent que l'étude des branchages récoltés sur les sites archéologiques du Nord de la France apporte de précieuses informations sur les pratiques culturelles et l'environnement des sites. JEAN-LOUIS EDOUARD parvient à définir, par la dendrochronologie, les dates d'abattage des bois de construction de plusieurs bâtiments (chapelle, granges) en montagne, révélant ainsi l'importance historique du patrimoine architectural alpin. FRÉDÉRIC GUIBAL et EMILIEN BOUTICOURT développent une étude sur les charpentes méditerranéennes qui montre que le sapin le mélèze sont les essences préférentiellement utilisées et contribue à la mise en place d'un nouveau référentiel représentatif du sapin sur la période allant du XI^e au XV^e siècle.

Enfin, la dernière partie de cet ouvrage regroupe des contributions d'ordre méthodologique, qui peuvent être utilisées dans différents domaines disciplinaires. L'article de CÉCILE MIRAMONT *et al.* présente les avancées récentes dans le domaine de la calibration de l'échelle des temps radiocarbone par les cernes d'arbres et en particulier le potentiel que représentent les bois subfossiles tardiglaciaires des Alpes du sud. Les autres articles proposent de nouveaux outils à l'usage des dendrochronologues. JÉRÔME LOPEZ SAEZ *et al.* proposent un retour d'expérience sur l'utilisation de la résistographie sur des arbres affectés par les avalanches. SANDRINE PARADIS-GRENOUILLET *et al.* présentent un logiciel (AnthracLoJ) pour reconstituer en routine les calibres des bois carbonisés ou non et ainsi mieux appréhender la gestion de la ressource en bois par les sociétés du passé. GEORGES LAMBERT *et al.* proposent un calcul filtrant les séries de cernes datées et fournissant une estimation du risque d'erreur, acceptable ou non, pour la datation de pièces de bois en fonction des objectifs de recherche. Pour que la représentation des thèmes traités soit complète, ce volume a été enrichi par les résumés des communications orales qui ne sont pas représentées par des articles.

Nous adressons nos remerciements aux partenaires et aux financeurs, aux participants, aux auteurs et aux relecteurs, qui ont contribué à la réussite du colloque et à la publication de cet ouvrage.

LAURENT ASTRADE, Cécile MIRAMONT

Introduction scientifique

La dendrochronologie : retour vers le passé

LUCIEN TESSIER

Retraité de l'Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie de Marseille.

2, rue du Luberon, F 84120 La Bastidonne.

A ma connaissance, le colloque de Dendrochronologie de l'automne 2009 à Digne-les-Bains est le premier qui s'affiche avec l'ambition d'une représentation aussi large que possible de la communauté des chercheurs français impliqués dans ce champ de recherche. Bien que toute discipline scientifique soit, à l'heure actuelle, largement tributaire d'une domination linguistique anglophone, il est important et rassurant de trouver quelques espaces d'expression scientifique dans notre langue. Défendre la biodiversité est devenu un impératif, mais il est tout aussi nécessaire d'entretenir «... *la diversité linguistique et culturelle dont se nourrit la science...* » (Lafforgue, 2005). Je tenais à souligner en préambule cette dimension plus générale que les problématiques dendrochronologiques.

Ayant donc accédé au statut de témoin, me voilà contraint de regarder derrière moi pour apporter ma contribution. Pour parodier l'humoriste Pierre Dac, qui disait : « *Monsieur a l'avenir devant lui, quand il se retournera il l'aura dans le dos* ».... Je me suis donc retourné : devant moi, le passé de la discipline, autour de moi, l'état des lieux tels qu'on peut les appréhender lorsqu'on est à l'écart des contraintes et échéances du moment, dans mon dos, les perspectives futures, que je laisse aux collègues réunis à cette occasion. Ma contribution se limitera donc à retracer une brève histoire de la dendrochronologie et dresser un tableau sommaire des multiples orientations de la dendrochronologie actuelle.

I - BRÈVE HISTOIRE DE LA DENDROCHRONOLOGIE

La définition restreinte de la dendrochronologie : « *Science qui étudie la variation d'épaisseur des cernes du bois afin d'établir une datation des objets en bois* » (Dumas, 2002) donne trop souvent une image fautive de la discipline ; la participation à ce colloque en fournit à contrario une preuve éclatante à travers les multiples problématiques abordées : archéologie, climatologie, écologie, géomorphologie, gestion des risques etc. Si la datation d'un objet en bois peut être un objectif tout à fait noble, cette façon réductionniste de voir la discipline fait peu de cas des questionnements à la base de toute recherche. Il est bien vrai que les opérations de datation constituent un préalable incontournable de la discipline et, il serait en outre regrettable de les réduire à des opérations techniques de routine. Elles génèrent en elles mêmes leurs propres problématiques, mais ne sont bien souvent que des points de départ. La chronologie ne doit cacher ni l'arbre, ni la forêt. Dès les premiers pas, avant même que le vocable de dendrochronologie ne soit explicitement utilisé, la multiplicité de ces problématiques était apparue. Il ne sera donc question ici que de la dendrochronologie prise dans son acception transdisciplinaire.

La Figure 1 présente chronologiquement quelques protagonistes de l'évolution de la discipline, depuis l'identification des structures associées à la croissance annuelle des arbres jusqu'aux derniers développements actuels. Les curieux pourront trouver la plupart des références utilisées sur divers sites internet facilement accessibles, et essentiellement dans les ouvrages de Fritts (1976) et Schweingrüber (1988, 1996), qui restent des ouvrages de base pour les dendrochronologues. Les deux revues majeures de dendrochronologie : *Tree Ring Bulletin* et *Dendrochronologia* fournissent également de précieuses références. Loin de moi l'idée de traiter ici « l'histoire de la dendrochronologie ». Un tel travail, qui reste d'ailleurs à faire, requiert les compétences d'un authentique historien. Je m'en tiendrai donc à l'évocation des trois grandes étapes qui ont marqué l'éclosion, puis le développement de la discipline.

La première étape, qui voit l'émergence de la discipline, est inféodée à la botanique, et plus particulièrement au vaste champ de la dendrologie ; elle est consacrée à l'identification anatomique du cerne et à son fonctionnement. Dynamisée par le développement des techniques d'observation microscopique, elle est, dans une première phase (XV^e, XVI^e, XVII^e, XVIII^e siècles), le fait des « savants » qui, de Léonard de Vinci à Brisseau de Mirbel (1802), investissent les questionnements touchant la physique, les sciences de la vie, la botanique, la foresterie, la technolo-

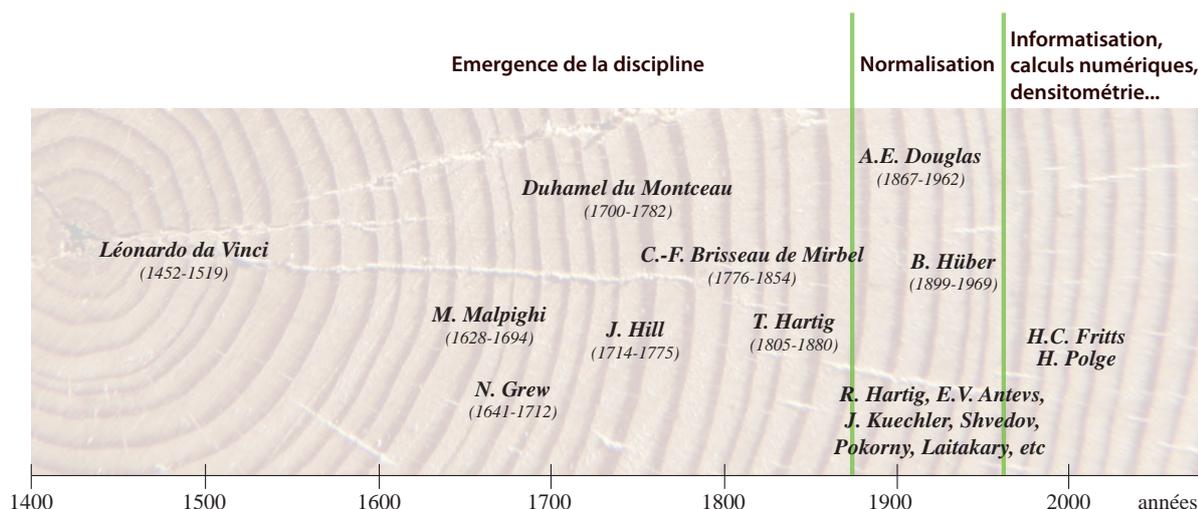


Figure 1 - Les principaux protagonistes du développement de la dendrochronologie.

gie du bois. Dans une deuxième phase (XIX^e) elle mobilise de nombreux chercheurs plus focalisés sur l'analyse des seules séquences chronologiques de cernes.

La deuxième étape, que l'on pourrait qualifier de fondatrice, pose les bases d'une pratique « normalisée » de la dendrochronologie, qui acquiert alors le statut de discipline, avec ses concepts, ses méthodes. Elle est à porter au crédit de deux chercheurs de part et d'autre de l'atlantique : Andrew E. Douglass aux Etats-Unis et Bruno Hüber en Allemagne.

La troisième étape, directement raccordée aux pratiques actuelles, voit, avec Harold C. Fritts, l'introduction des méthodes de calcul numérique, statistique, dynamisées par la mise en oeuvre de l'ordinateur. L'analyse densitométrique, introduite par Huber Polge puis développée par Fritz Hans Schweingrüber, vient, presque simultanément, enrichir l'exploitation des séquences de cernes représentées jusqu'alors par les seules largeurs.

1 - Les premières investigations : de l'arbre au cerne

Dès l'aube de l'humanité, les arbres occupent une place majeure dans son développement, non seulement parce qu'ils fournissent nourriture, abri et chaleur, mais aussi parce qu'ils fournissent le matériau de construction assurant la sédentarisation (Dumas, 2002). Il est fort possible que le questionnement sur la croissance radiale des arbres soit concomitant du développement de la coupe des arbres. L'apparition de la scie, en proposant une image claire de la succession des cernes, a sans doute rapidement permis de préciser leur caractère annuel.

La première référence écrite sur l'appréhension du rôle de l'arbre dans l'enregistrement des fluctuations climatiques est attribuée à Léonard de Vinci (Stalling *et al.*, 1937) au XV^e siècle. Vient ensuite toute une génération de savants qu'il est difficile de caser dans une seule discipline, mais qui investissent, entre autre, le champ de la Botanique, et donc s'intéressent à l'anatomie et la croissance des arbres. Pour la plupart d'entre eux, l'outil majeur de leurs investigations est le microscope. On citera Malpighi, Grew, Hales, Buffon, Duhamel du Montceau. Sur la base des observations anatomiques au microscope (Malpighi, 1675 ; Grew *et al.*, 1685) émergent les questionnements physiologiques (Hill, 1770 ; Duhamel du Montceau, 1788). Ce dernier propose déjà une théorie cohérente de la mise en place du cerne grâce à une expérimentation mettant en oeuvre des fils d'argent placés dans le liber. En Europe comme aux Etats-Unis, de nombreux chercheurs apportent alors leur contribution. La plupart se situent en prolongement des questionnements anatomique et physiologique précédents. Parmi eux, T. Hartig puis R. Hartig proposent, dès le milieu du XIX^e siècle, une conception claire du fonctionnement cambial. Par ailleurs, émerge déjà une diversification des thématiques et une véritable analyse des séquences chronologiques de cernes. Ainsi, Pokorny (1869) compare séquences moyennes de cernes et données météorologiques, Hartig (1891) s'intéresse également aux dommages causés aux arbres par les insectes, Kuechler (*in* Campbell, 1949), traite du rapport entre la variabilité du cerne et la sécheresse. Kaptein, (1914) (aussi *in* Stalling *et al.*, 1937), Laitakari (1920), Eide (1926), initient en Europe les premières études que l'on peut qualifier de dendroclimatologiques. Si l'on s'en tient à la période 1840-1917 (*in* Schweingrüber, 1988), Antevs, (1917) recense, pour cette période, plus de 300 publications consacrées aux séquences de cernes,

2 - L'étape fondatrice

À l'issue des étapes précédentes il est donc acquis que le fonctionnement cambial conduit à la formation d'un cerne annuel dans lequel on peut même reconnaître la marque des saisons, « les cercles des saisons » selon Hill (1770). Il est également acquis que les séquences chronologiques de cernes annuels constituent un véritable matériau d'étude. Il faudra cependant attendre le début du XX^e siècle pour que soit réalisé et exploité le large potentiel que pouvaient représenter ces séquences chronologiques. C'est à l'astronome Andrew Ellicot Douglass que l'on doit la mise en valeur à la fois archéologique et climatologique des chronologies de largeurs de cernes. Ses travaux font de lui le père incontestable de la dendrochronologie. H.C. Fritts, dans son ouvrage de base (*Tree Rings and Climate*, 1976) retrace de façon détaillée son cheminement, depuis ses premières interrogations dès 1901 sur la mise en évidence d'un lien entre les cycles de l'activité solaire et le climat (1919), jusqu'à la création à Tucson du « Laboratory of Tree Ring Research » en 1937. Entre temps, il avait investi simultanément le champ de l'archéologie (1921, 1935), faisant de la dendrochronologie un outil de datation des bois incontournable, et le champ de la climatologie (1914), jetant les bases des grandes synthèses spatio-temporelles dendroclimatiques actuelles (Hughes, 2002). Bien que Douglass ne soit pas l'inventeur de l'interdatation (on peut l'attribuer à Duhamel du Montceau et Buffon en 1737 (*in* Fritts, 1976)), il est celui qui systématisa la méthode et fut le premier à prendre conscience du potentiel que représentait l'exploitation de la variabilité temporelle et spatiale des séquences de cernes.

Simultanément, en Europe, la mise en oeuvre des méthodes de Douglass trouva un large écho auprès du Botaniste allemand Bruno Hüber (Schweingruber, 1988). Comme Douglass, il s'attacha à résoudre des problèmes de datations archéologiques. Après ses premiers travaux, consacrés à la construction de longues chronologies à partir de bois sub-fossiles ou de bois d'oeuvre (1941), il fut rapidement conduit à aborder les problèmes d'exploitation, dans une optique climatologique, des séries de cernes. Par ailleurs, ses études sur les peuplements d'altitude ont contribué à révéler la dimension écologique de la dendrochronologie.

3 - Le développement récent, la diversification

Incontestablement, le premier laboratoire entièrement consacré à la dendrochronologie est celui de Tucson, Arizona (USA). Créé en 1937, il a joué un rôle de modèle pour les multiples unités de recherche qui ont vu le jour après la guerre de 1939-1945, et suscité une large expansion de la discipline : Schulman (1940), ne recense alors pas moins de 412 publications. La diversification des thématiques de recherche abordées par la dendrochronologie se fait alors sous l'impulsion de deux développements conceptuel et technologique, simultanément initiés par deux chercheurs qui ont marqué cette fin du XX^e siècle.

Le premier Harold C. Fritts, successeur de Douglass à Tucson, illustre parfaitement la diversification des thématiques abordées par la dendrochronologie. Sa contribution va bien au delà de la seule introduction des techniques de calcul intensifs sur ordinateurs. Certes, son ouvrage majeur « *Tree Rings and Climate* » (1976) consacre les quatre derniers chapitres à l'analyse des relations cerne climat dans leurs dimensions spatiale et temporelle, mais, toute la première partie traite de façon détaillée du fonctionnement écophysologique de l'arbre dans la construction du cerne. Toutes les bases conceptuelles y sont abordées, et il reste un ouvrage de référence, toujours d'actualité, qu'il est impossible d'ignorer.

Le second, Hubert Polge, fondateur en 1964 de la « Station de recherche sur la qualité des bois » à Champenoux (France) est l'inventeur de l'analyse densitométrique des bois (1966). Initialement destinée à établir les liens entre la structure des bois, leurs caractéristiques techniques et les pratiques sylvicoles, cette technique est à la base du développement de chronologies basées non plus sur la largeur des cernes mais sur les fluctuations de la densité du bois et plus particulièrement la densité maximale. Elle a connu un large développement sous l'impulsion de Fritz Hans Schweingrüber (Schweingrüber *et al*, 1978) et de son équipe du « *Swiss Institute of Forestry Research* » à Birmensdorf (Suisse).

À ces deux démarches fondatrices, il faut associer l'apport de W.F. Libby, à l'origine de la méthode de datation utilisant le dosage du ¹⁴C (Libby *et al.*, 1949). Établie au départ sur des chronologies déjà datées par la dendrochronologie, la méthode s'est affinée grâce aux contrôles effectués sur des longues chronologies, et actuellement, en retour, toute date ¹⁴C se doit d'être recalibrée par un contrôle de ce type (Libby, 1963).

II - LA DENDROCHRONOLOGIE ACTUELLE DANS SES MULTIPLES DIMENSIONS

À l'issue de ces percées fondamentales, la diversification des champs de recherche conduit, sur tous les continents, à une large expansion de la discipline. Des laboratoires d'Archéologie, de Technologie du bois, de Foresterie, de Paléoécologie, de Climatologie et d'Ecologie hébergent alors, et continuent d'héberger chercheurs isolés et équipes investies dans les problématiques dendrochronologiques. À titre d'exemple on peut mentionner en France les équipes de Besançon (Archéologie), de Nancy (Foresterie), de Marseille (Paléoécologie) qui se sont imposées sous l'impulsion de chercheurs initialement isolés (Lambert, 2006 ; Polge, 1966 ; Serre, 1973).

Cette expansion diversifiée est, pour une grande part, attribuable aux caractéristiques mêmes des chronologies de cernes. Enrichie de l'analyse densitométrique, et plus récemment, des ratios isotopiques ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, D/H, $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) chaque mesure effectuée sur le cerne (largeur, surface, densité, isotopes, etc.) propose une information environnementale quantitative disponible sur de vastes espaces. À ces mesures s'ajoutent des marques ponctuelles : traces d'incendies, d'impacts glaciaires, d'attaques d'insectes, chutes de blocs, crues, variations de niveau lacustre, impacts chimiques, etc.). Qu'elles soient issues d'arbres vivants, de troncs subfossiles ou d'artéfacts, ces informations ont la particularité d'être très précisément datées. Année après année, saison après saison l'enregistreur arbre a archivé dans le tronc et les racines ses « expériences environnementales » réalisées aux interfaces houppier-atmosphère, épiderme-atmosphère ou épiderme-sol. Il appartient au dendrochronologue de déchiffrer et d'interpréter ces enregistrements couvrant, sans interruption, des centaines d'années, voire des millénaires. Le matériau proposé suscite les questionnements diversifiés des climatologues, des hydrologues, des pédologues, des géomorphologues, des écologues ou des écophysiologues. Il n'est donc pas surprenant que ces questionnements puissent être à l'origine des différentes disciplines connexes à la dendrochronologie : dendroarchéologie, dendroécologie, dendroclimatologie, dendrohydrologie, dendrogéomorphologie, dendrochimie, etc. Au delà de la simple énumération, la Figure 2 propose cette image transdisciplinaire de la dendrochronologie.

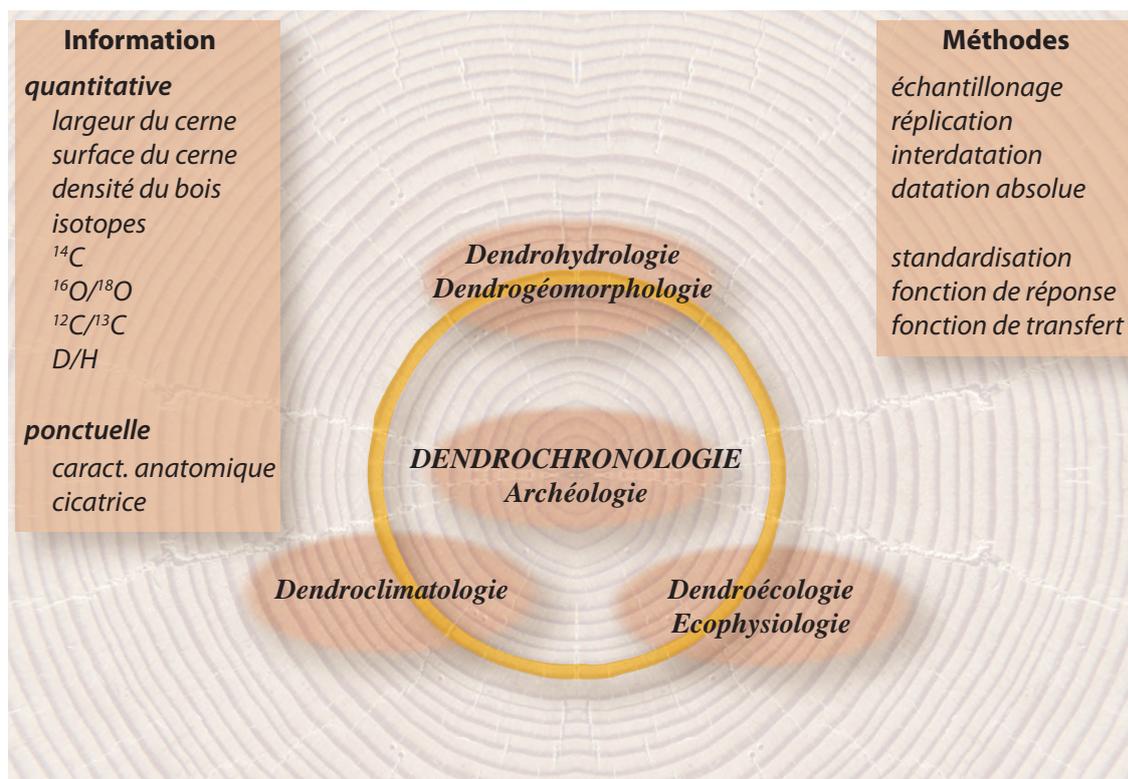


Figure 2 - La dendrochronologie dans ses dimensions transdisciplinaires ; l'information traitée, les méthodes.

Sur la base d'une méthodologie commune (techniques d'échantillonnage, interdatation, datation absolue) qui doit garantir la qualité chronologique du matériau, se sont développées des méthodes adaptées à l'extraction de l'information environnementale spécifique (l'environnement incluant le climat) : méthodes de calibration, de standardisation, fonctions de réponse, fonctions de transfert, tout un vocabulaire (Kaennel et Schweingrüber, 1995) connu des dendrochronologues. Quel que soit l'angle d'approche : travaux historiques tels que datation d'occupations humaines,

de monuments, d'objets d'art, recherche d'un signal dans l'optique d'une reconstruction de paramètres climatiques, reconstruction de phases d'incendies, historiques de fluctuations glaciaires, d'attaques d'insectes, de champignons, problématiques de dynamique forestière, caractérisation technologique des bois etc., toutes ces investigations passent par un dialogue transdisciplinaire permanent. On retrouve, chapitre après chapitre, toutes les facettes du déploiement transdisciplinaire de la dendrochronologie dans l'ouvrage de F. Schweingrüber (1988) ; il apparaît tout aussi clairement dans les actes de ce colloque.

Dans ces dialogues, écophysologie et écologie occupent une place à part, dans la mesure où ces deux disciplines s'intéressent davantage à l'enregistreur (l'arbre) qu'à l'enregistrement (les chronologies de cernes). La première s'attache à élucider les mécanismes de mise en place du cerne, la seconde assure l'intégration du fonctionnement de l'arbre dans l'écosystème et tente de caractériser le comportement des essences en fonction de l'environnement (Tessier, 1984, 1989). Ces préoccupations étaient celles des précurseurs investis dans les recherches sur l'anatomie du bois. Elles sont toujours d'actualité, stimulées par la mise en oeuvre des techniques électroniques ; en témoigne le récent développement des mesures en continu de la croissance du cerne, des flux de sève, des échanges gazeux arbre-atmosphère. Ces deux disciplines sont également à la base de l'évolution récente, des méthodes de standardisation prenant en compte les phénomènes de compétition au sein de l'écosystème forestier (Becker *et al.*, 1994), de l'évolution des modèles de relation climat croissance, d'une approche statistique vers une approche mécaniste (Rathgeber *et al.*, 2005).

Tout aussi singulière est la place de la dendroarchéologie (vocabulaire peu utilisé). Dès l'étape fondatrice, l'archéologie a été un moteur du développement de la dendrochronologie. Elle occupe encore, si l'on en croit le nombre de chercheurs impliqués dans les unités de recherche en archéologie, une place majeure. Par ses exigences de datation elle est placée au coeur des problématiques basiques d'interdatation et de standardisation qui intéressent tous les dendrochronologues.

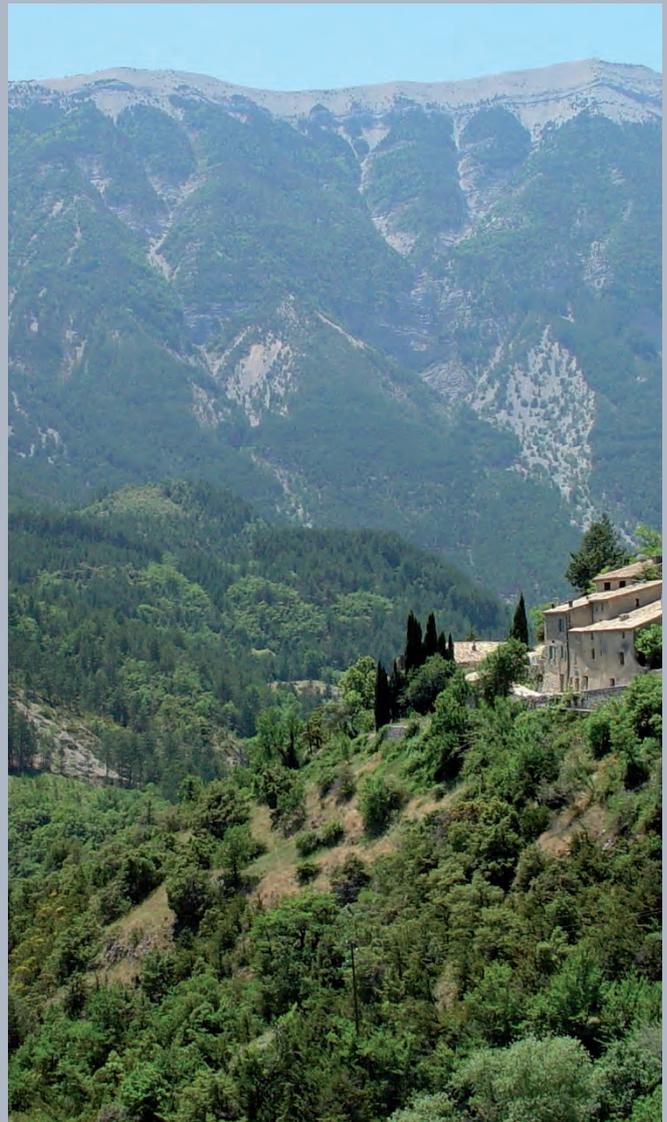
Malgré la grande diversification des recherches sur les cernes de croissance des arbres, il ne semble pas que la discipline soit en train de sombrer dans un excès de spécialisation comme pouvait le craindre Schweingrüber en 1988. Depuis 1976, les colloques internationaux de Dendrochronologie, qui, tous les quatre ans, ponctuent la vie des chercheurs, ont assuré une cohérence qui ne s'est pas diluée dans cette appropriation multidisciplinaire, bien au contraire. Pour qualifier l'état de l'art actuel de la dendrochronologie, je trouve le qualificatif de « vibrant » utilisé par Hughes (2002) parfaitement adapté. Ce même qualificatif peut être employé pour qualifier ce qui nous est présenté ici et constitue une bonne représentation de la vitalité de la discipline en France. Les références bibliographiques attachées aux différentes communications compléteront utilement ce tour d'horizon d'une discipline bien vivante.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTEVS E.V., 1917. Die Jahresringe der holzgewächse und die Bedeutung derselben als klimatischer indikator. *Prog. Reih Bot.* 5, 285-386.
- BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., PICARD J.F., ULRICH E., 1994. Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX^e siècle. *Revue forestière française*, XLVI, 4, 335-341.
- BRISSEAU DE MIRBEL C.-F., 1802. Traité d'Anatomie et de Physiologie végétale, 1^{ère} et 2^{ème} partie, 112 et 100 p.
- CAMPBELL T.N., 1949. The Pioneer tree-ring work of Jacob Keuchler. *Tree-ring Bulletin*, 15 (3), 16-20.
- DOUGLASS A. E., 1914. A method of estimating rainfall by the growth of trees. In « The Climatic Factor » (E. Huntington, ed.), *Carnegie Inst. Wash. Publ.* 192 p.
- DOUGLASS A. E., 1919. Climatic cycles and Tree growth. *Carnegie Inst. Wash. Publ.* Vol. 1, 289 p.
- DOUGLASS A. E., 1921. Dating our prehistoric ruins. *Natur. Hist.* 21 (1), 27-30.
- DOUGLASS A. E., 1935. Dating Pueblo Bonito and other ruins of the southwest. *Nat. Geogr. Soc. Contrib. Tech. Pap.* Pueblo Bonito, Ser. 1. 1-74.
- DUHAMEL DU MONTCEAU H.-L., 1788. La physique des arbres. <http://books.google.fr>, 308 p.
- DUMAS R., 2002. Traité de l'arbre, essai d'une philosophie occidentale. *Actes Sud*, 256 p.
- EIDE E., 1926. Uber Sommertemperature und Dickenwachstum im Fichtenwald. *Medd. Norske Skogforsoksvesen*, 2, 87-104.
- FRITTS H. C., 1976. Tree rings and Climate. London, New York, San Francisco. *Academic Press*, 567 p.
- GREW N., BOYLE R., DEDU N., 1685. *Anatomie des plantes*. <http://books.google.fr>
- HARTIG R., 1891. Traité des maladies des arbres (traduit sur la deuxième édition allemande par J. GERSHEL et E. HENRY). Berger Levrault et C^{ie} éd., (1^{ère} édition allemande en 1882).
- HÜBER B., 1941. Aufbau einer mitteleuropäischen Jahringchronologie. *Mitt. H. G. Akad. Deutsh. Forstwiss.*, 3 137-142.
- HILL J., 1770. The construction of timber from it's early growth explained by the microscope and proved from experiment. <http://books.google.fr>, 170 p.
- HUGHES M. K., 2002. Dendrochronologie in Climatology – the state of the art. *Dendrochronologia*, 20/1, 95-116.

- KAENNEL M. et SCHWEINGRÜBER F.H., 1995. Multilingual glossary of Dendrochronology. Kluwer publisher, WSL, 467 p.
- KAPTEIN J. C., 1914. Tree growth and meteorological factors. *Recueil des travaux botaniques néerlandais*, 11, 70-93.
- LAFFORGUE L., 2005. Le français au service des sciences. *Pour la Science*, 329, mars, 8.
- LAITAKARI E., 1920. Untersuchungen über die Einwirkung der Witterungsverhältnisse auf das Längen und Dickenwachstum der Kiefer. *Acta Forest Fenn*, 17, 53 p.
- LAMBERT G.-N., 2006. Dendrochronologie, Histoire et Archéologie, modélisation du temps. Le logiciel Dendron II et le projet Historic Oaks. Habilitation à diriger des recherches, Université de Franche-Comté, Besançon, 2006, 2 vol. 152 et 206 p.
- LIBBY W. F., 1963. Accuracy of radiocarbon dates. *Science*, 140, 278-280.
- LIBBY W.F., Anderson E.C., Arnold J.R. 1949. Age determination by radiocarbon content. World-wide assay of natural radiocarbon. *Science*, 9, 227-228.
- MALPIGHI M., 1675. *Anatome plantarum*. 173 p.
- POKORNY A., 1892. Methode um den meteorologischen Coefficienten des jährlichen Holzzuwachses der Dicotyledonenstämme zu ermitteln. *Tharandt forstl. Jb*, 22, 81p
- POLGE H., 1966. Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par l'exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. *Ann. Sc. Forest.*, 23, 1-206.
- RATHGEBER C.B.K., MISSON L., NICAUL, A., GUIOT J. 2005. Bioclimatic model of tree radial growth. application to the french Aleppo pine forests. *Tree structure and function*, 19, 162-176.
- SCHULLMAN E., 1940. A Bibliography of tree ring analysis. *Tree-Ring Bull.*, 6 (4), 26-39.
- SCHWEINGRÜBER F.H., 1988. *Tree Rings, Basic and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, 276 p.
- SCHWEINGRÜBER F.H., 1996. *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Birmensdorf, Swiss Federal Institut for Forest, Snow and Landscape Research. Haupt, 697 p.
- SCHWEINGRÜBER F.H., FRITTS H.C., BRAEKER O.U., DREW L.G. SCHÄR E., 1978. The X-ray technique as applied to dendrochronology. *Tree-Ring Bull.*, 38, 61-91.
- SERRE F., 1973. Contribution à l'étude dendroclimatologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*). Thèse, Université d'Aix-Marseille III.
- STALLING JR. W.S., SCHULMAN E., DOUGLASS A.E. 1937. Some early papers on tree rings (Kuechler I.J. by Stallings, Kapteyn by Schulman). *Tree-Ring Bull.*, 3 (4), 27-28.
- TESSIER L., 1984. Dendroclimatologie et écologie de *Pinus silvestris* L. et *Quercus pubescens* Willd. Dans le sud-est de la France. Thèse d'Etat, Université Aix-Marseille III, 238 p.
- TESSIER L., 1989. Spatio-temporal analysis of Climate-tree-ring relationships. *New Phytologist*, 111 (3).

Dendroécologie



Au recto :

À gauche : arbres du bocage d'Ille-et-Vilaine (photo V. Bernard).

À droite : le Mont Ventoux : influences montagnarde et méditerranéenne (photo M. Cailleret).

SENSIBILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS TEMPÉRÉS FRANÇAIS À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET AUX ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES EXEMPLE DU RÉSEAU RENECOFOR

*SENSITIVITY OF FRENCH TEMPERATE FORESTS TO CLIMATE VARIABILITY AND EXTREME EVENTS:
EXAMPLE OF THE FRENCH NETWORK RENECOFOR*

FRANÇOIS LEBOURGEOIS¹, CYRILLE B.K RATHGEBER², PIERRE MÉRIAN¹, ERWIN ULRICH³

¹ AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois
(LERFoB), ENGREF, 14 rue Girardet, F 54000 Nancy.

² INRA, UMR1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, F 54280 Champenoux.

³ Office National des Forêts, Département Recherche et développement, F 77000 Fontainebleau.

Contact : francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr

RÉSUMÉ

Les relations entre le climat et la croissance radiale de 63 peuplements (1879 arbres) du réseau RENECOFOR ont été étudiées à travers la réponse aux événements extrêmes (années caractéristiques) et à la variabilité normale du climat (fonctions de réponse) sur la période 1949-1994. L'étude a porté sur 15 hêtraies (450 arbres), 11 chênaies sessiliflores (324), 4 chênaies pédonculées (119), 11 sapinières (328), 8 pessières (239) et 14 pineraies sylvestres (419) réparties sur l'ensemble du territoire. Les deux approches se sont révélées complémentaires et ont montré l'importance des conditions thermiques hivernales et du bilan hydrique sur la croissance des arbres forestiers. Globalement, les conditions automnales de l'année précédente (à travers les températures ou le bilan hydrique) et les températures hivernales (essentiellement février et avril) modulent la croissance du bois initial et le bilan hydrique du début d'été (juin-juillet) celle du bois final. Le sapin, l'épicéa et les chênes sont les essences pour lesquelles la mise en place du bois initial dépend le plus fortement des conditions de l'automne précédent (à travers la température et le bilan hydrique) et des conditions thermiques hivernales. Pour ces espèces, la croissance du bois final est gouvernée essentiellement par le bilan hydrique estival. En revanche, pour le hêtre et le pin sylvestre, la croissance du bois initial dépend essentiellement des conditions de sécheresse du début de saison de végétation. Pour toutes les essences, l'effet du bilan hydrique est d'autant plus fort que les conditions locales de xéricité augmentent : réserve utile maximale en eau (RUM) du sol inférieure à 100 mm pour le hêtre, altitude inférieure à 800 m et/ou RUM < 100 mm pour le sapin, climat océanique de plaine peu arrosé (précipitations annuelles de l'ordre de 700 mm) pour le pin sylvestre et les chênes.

MOTS-CLÉS : DENDROÉCOLOGIE, ANNÉES CARACTÉRISTIQUES, FROIDS HIVERNAUX, SÉCHERESSE, CROISSANCE RADIALE, QUERCUS PETRAEA, QUERCUS ROBUR, FAGUS SYLVATICA, ABIES ALBA, PICEA ABIES, PINUS SYLVESTRIS.

ABSTRACT

The influence of climate on the radial growth of 63 mature stands (1879 trees) growing under different climatic and soil conditions was investigated using chronologies developed from the French Network RENECOFOR. The relationships between climate and ring widths were analyzed using extreme growth years and response functions analysis (1949-1994). The study was led on 15 beech stands (450 trees), 11 sessile oak stands (324), 4 pedunculate oak stands (119), 11 silver fir stands (328), 8 Norway spruce stands (239) and 14 Scots pine stands (419). Both approaches highlighted the major role of winter temperatures and water balance on radial growth. For Silver fir, Norway spruce and oaks, prior autumn weather conditions (through temperature and water balance) and winter temperatures (February and April) influence earlywood growth whereas summer water balance influences latewood enhancement. On the other hand, the growth of both ring components for beech and Scots pine depends mainly on current summer water balance. For all the studied species, the importance of the water balance increases with increasing local water stress : maximal soil water content (SWC) < 100 mm for beech, altitude < 800 and/or SWC < 100 mm for Silver fir, oceanic climate with low annual precipitations (about 700 mm) for Scots pine and oaks.

KEYWORDS: DENDROECOLOGY, POINTER YEARS, WINTER FROSTS, DROUGHT, RADIAL GROWTH, QUERCUS PETRAEA, QUERCUS ROBUR, FAGUS SYLVATICA, ABIES ALBA, PICEA ABIES, PINUS SYLVESTRIS.

INTRODUCTION

Au début des années 1990, le « Réseau National de suivi à long terme des écosystèmes Forestiers » (RENECOFOR) a été mis en place par l'Office National des Forêts. En 1997, une étude dendrochronologique, associant mesures et datation des cernes d'accroissement annuels, a été entreprise afin de caractériser l'histoire des 102 peuplements avant l'installation du réseau (Lebourgeois, 1997). Afin d'améliorer nos connaissances sur la réponse des espèces forestières à la variabilité climatique « nor-

male » mais également aux événements extrêmes, des analyses dendroclimatiques ont été entreprises sur 63 des 102 peuplements. Les sites retenus correspondent à 6 espèces et couvrent une vaste gamme de conditions pédo-climatiques. Les objectifs sont de définir les rôles des facteurs climatiques sur la croissance radiale pour chaque essence, de mettre en évidence les effets des conditions stationnelles locales sur la sensibilité de ces essences au climat et de comparer les réponses entre les espèces.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1 - Caractéristiques des peuplements

Les 6 espèces étudiées sont les chênes sessile et pédonculé (11 et 4 peuplements, 324 et 119 arbres), le hêtre (15, 450), le pin sylvestre (14, 419), le sapin pectiné (11, 328) et l'épicéa commun (8, 239) (Figure 1). Les 63 peuplements sont des futaies adultes (41 à 185 ans, 80 ans en moyenne) issues de régénérations naturelles ou de plantations (en pins sylvestres et une partie en épicéas). Pour chaque site, la réserve utile maximale en eau du sol (RUM) a été calculée à partir des descriptions pédologiques (Brêthes *et al.*, 1997). Les pessières et les sapinières correspondent majoritairement à des peuplements d'altitude (en moyenne 1000 m) sous climat montagnard froid et humide sur des stations à RUM comprises entre 100 et 120 mm. Les pineraies ont été échantillonnées majoritairement en plaine sur des stations assez sèches (RUM

moyenne = 100 mm) dans la partie nord de la France le long d'un gradient ouest-est. Le climat varie d'un climat océanique doux et sec à un climat semi-continentale plus froid et arrosé. Les chênaies couvrent éga-

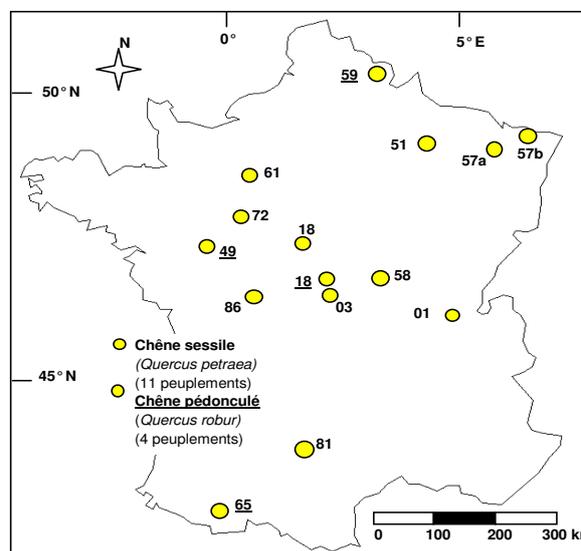
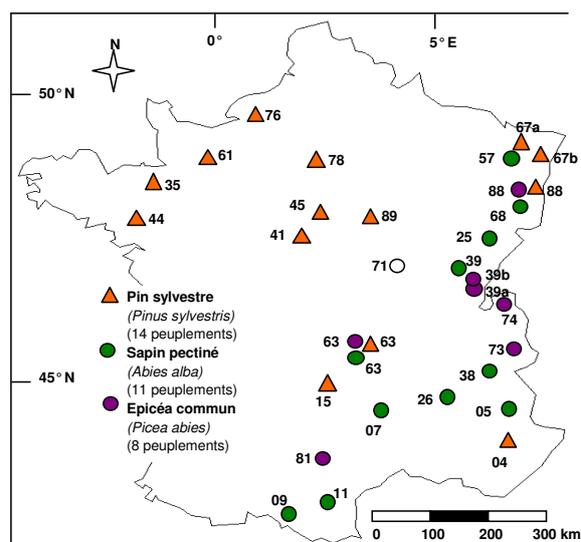
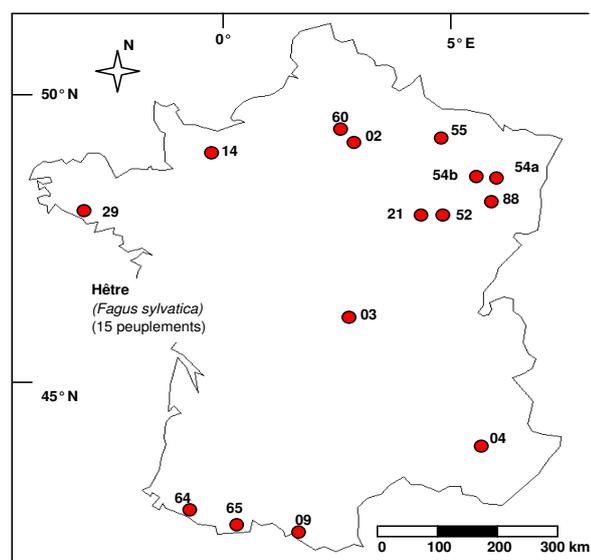


Figure 1 - Localisation géographique des 63 peuplements étudiés du réseau RENECOFOR. Le chiffre indique le département.

lement la grande partie nord de la France sous climat doux et peu arrosé de plaine avec cependant des stations à RUM élevées (180 mm en moyenne). Enfin les hêtraies couvrent une vaste gamme allant des hêtraies d'altitude froides et arrosées aux contextes océanique ou semi-continentale de plaine (RUM de 77 à 274, 130 mm en moyenne).

2 - Standardisation et calcul des fonctions de réponse

1879 arbres dominants ont été carottés (en 1995) jusqu'à la moelle à 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler (une carotte par arbre, 28 à 30 arbres par peuplement). Les 140 000 cernes correspondants ont été mesurés avec une précision en 1/100 de mm à l'aide d'un système vidéo-informatisé spécifique. Dans chaque cerne, la largeur du bois initial et du bois final a été mesurée séparément (Lebourgeois, 2000). Après mesure, chaque série individuelle a été interdatée à l'aide d'années caractéristiques (Schweingruber *et al.*, 1990). Dans notre étude, les années caractéristiques correspondent aux dates pour lesquelles au moins 75 % des arbres du peuplement ont présenté une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente (Becker,

1989). La sensibilité moyenne (MS) et l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) ont été calculées pour chaque arbre et compartiment du cerne et moyennées par peuplement. La standardisation et le calcul des chronologies maîtresses (standard chronology STD) ont été réalisés à l'aide du programme ARSTAN v6.05P (Cook, 1985).

Les données mensuelles de températures minimales et maximales (Tmin et Tmax en °C) et de précipitation, issues de 50 stations du réseau Météo-France, ont été utilisées pour calculer les fonctions de réponse (période 1919-1994). Pour chaque peuplement, les fonctions de réponse ont été calculées pour le bois initial et le bois final à l'aide du logiciel DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul, 2004). Les paramètres climatiques ont été considérés de septembre de l'année n-1 à août de l'année n. Les analyses ont été menées en utilisant 12 variables de précipitations ou 12 variables de températures maximales ou minimales. Des analyses en composantes principales suivies de classifications ascendantes hiérarchiques ont été réalisées sur les années caractéristiques et les coefficients « *bootstrapped* » en utilisant le logiciel SPLus 2000 (Data Analysis Products Division, MathSoft, Seattle, WA) de façon à mettre en évidence les similitudes de réponse au climat entre espèces et sites.

II - RÉSULTATS

1 - Sensibilité aux événements extrêmes

Dans la majorité des cas, les croissances extrêmes sont la résultante d'années particulièrement sèches ou pluvieuses ou de froids hivernaux intenses (Figure 2). Les hêtraies ont réagi fortement et négativement en 1959, 1962, 1976 et 1989. Ces années font partie des trois ou quatre sécheresses les plus longues (1 à 2 mois de plus que la normale) et les plus intenses (jusqu'à 8 fois la normale) sur la période analysée (Lebourgeois, 2006 ; Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Pour ces quatre années, la réduction a été en moyenne de 33 %. À l'opposé, les années 1958 et 1977 ont été très peu contraignantes ce qui s'est traduit par des croissances plus fortes que la moyenne (63 % en moyenne). Pour les hêtraies, la station module clairement la sensibilité aux extrêmes qui apparaît d'autant plus forte que la station est sèche. Ainsi, sous le seuil de 100 mm, la fréquence d'années caractéristiques dépasse le seuil de 40 % et les réductions de croissance sont d'autant plus fortes que la RUM est faible (non montré). Pour les chênaies, l'année 1976 a marqué 80 % des peuplements avec une diminution moyenne de croissance de 31 %. Pour les autres années, ce sont essentiellement les chênaies de l'ouest qui ont présenté des réductions de croissance notables (Figure 2). Concernant les deux

chênes, il n'est pas apparu d'année caractéristique spécifique à chaque espèce. Cependant, le chêne pédonculé a tendance à répondre plus fortement aux sécheresses (Lebourgeois, 2006). Les chênes ont également fortement réagi au froid intense de l'hiver 1956 qui a été le mois le plus froid de toute la période pour tous les peuplements. En moyenne, la température minimale a été de -9,4 °C (-7 °C pour CHS61 à -13,5 °C pour CHS01). En ce qui concerne les résineux, la réponse du sapin est fortement liée aux années froides (1956, 1986) (Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2010) (Figure 2). Pour les sites d'altitude, la réduction moyenne de croissance passe de 26 % à 36 % entre 1000 et 1400 m. Pour les sites plus bas et plus secs (< 1000 m, RUM < 100 mm), l'effet du froid est moins fréquent mais la croissance apparaît plus fortement réduite en cas de sécheresses prononcées (1976, 1989). La réponse des pins sylvestres est fortement associée aux conditions hydriques estivales. Les peuplements de plaine de l'ouest de la France poussant sous climat océanique chaud et sec (P moyenne : 700 mm) présentent une plus forte sensibilité aux années sèches (1959, 1969, 1976, 1989) par rapport aux pineraies plus continentales ou d'altitude. Enfin, pour l'épicéa, il n'a pas été possible de mettre en évidence un effet notable des conditions du milieu sur la réponse aux extrêmes qui

apparaît être liée à la fois à la sécheresse et au froid hivernal. Il faut cependant noter qu'à conditions de milieu équivalentes, l'épicéa est apparu moins sensible au froid que le sapin.

2 - Réponse au climat moyen

Trois périodes clés ont été mises en évidence. Elles sont liées aux conditions automnales de l'année précédente (à travers les températures ou le bilan hydrique), aux températures hivernales (essentiellement février et avril) et au bilan hydrique du début d'été (juin et juillet). L'importance de ces périodes varie fortement selon les espèces mais également, au sein d'une même espèce, selon les conditions écologiques de croissance des arbres (Figure 3). Pour 70% des hêtraies, la mise en place du bois initial dépend exclusivement du bilan

hydrique du début d'été (effet négatif des Tmax et positif de P des mois de juin et juillet) et celle du bois final des températures minimales du mois d'août. Ce modèle de réponse correspond aux hêtraies de plaine (alt. moyenne : 340 m) peu arrosées (800 mm) et poussant sur des sols à RUM moyenne (130 mm). Dans ce groupe, la liaison avec le bilan hydrique augmente quand la RUM diminue et, comme pour les années caractéristiques, le seuil de 100 mm apparaît être un seuil important de sensibilité (Lebourgeois, 2006 ; Lebourgeois *et al.*, 2005). Pour les autres hêtraies poussant à des altitudes plus élevées (moy. 550 m) et bénéficiant de conditions hydriques plus favorables ($P > 1000$ mm, RUM = 150 mm), le bilan hydrique estival n'est plus un facteur explicatif majeur. La croissance annuelle dépend en grande partie des conditions automnales de l'année précédente (septembre et octobre) et des températures en début de saison de végétation (avril). La

réponse des chênes est apparue très hétérogène et sans logique stationnelle claire (Lebourgeois, 2006). Ainsi, pour 46% des chênaies, la mise en place du bois initial est gouvernée par un automne clément l'année précédente (effet positif des températures d'octobre ou novembre n-1). Pour le bois final, la relation constatée avec le bilan hydrique du début d'été (essentiellement juin) correspond aux chênaies les plus « sèches » (RUM < 180 mm) et majoritairement situées dans le secteur ligérien ($P < 750$ mm, températures moyennes estivales de 20 °C). Pour les résineux, les modèles de réponse sont apparus assez différents entre les espèces (Figure 4) (Lebourgeois, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2010).

| Espèce | Hêtre | | Chênes | | Epicéa | Sapin | | Pin sylvestre | |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|------------|
| Alt. (m) | 290 | 623 | 181* | 245 | 1014 | 802 | 1105 | 128* | 731 |
| RUM (mm) | 93 | 169 | 189 | 180 | 108 | 99 | 113 | 119 | 68 |
| P année (mm) | 845 | 1051 | 748 | 899 | 1320 | 1219 | 1078 | 691 | 1018 |
| T Jan (°C) | 1,9 | 4,3 | 3,4 | 1,8 | 1,2 | 2,1 | 0,7 | 3,7 | 1,9 |
| T Juil (°C) | 18 | 19,2 | 18,6 | 19,2 | 16,8 | 17,8 | 17,7 | 18,3 | 18,2 |
| Nb peupl. | 7 | 8 | 8 | 5 | 8 | 5 | 6 | 8 | 6 |
| 1949 | | | | | -14 | | | | -33 |
| 1950 | | | | | | | -19 | | 26 |
| 1951 | 57 | | | | | | 43 | | 43 |
| 1952 | -33 | | | | | | -20 | | -29 |
| 1954 | | | -28 | | | | | | |
| 1955 | 67 | | | | 31 | | 35 | | |
| 1956 | | | -25 | -29 | | | -33 | | |
| 1957 | | -27 | | | | | | | 30 |
| 1958 | 54 | | 58 | 64 | | | | | |
| 1959 | -38 | | | | | | | | -40 |
| 1960 | | | | | | | | | 30 |
| 1961 | | | | 32 | | | 39 | | |
| 1962 | -33 | | -23 | | -27 | -27 | -28 | | -31 |
| 1963 | | | | | 40 | | | | 33 |
| 1964 | -29 | | | | | | 42 | | -35 |
| 1965 | 47 | | | 41 | | | -21 | | 39 |
| 1966 | | | | | | | 29 | | 56 |
| 1969 | | | | | | | 34 | | -18 |
| 1970 | | | | | | | -22 | | |
| 1971 | | | | | | | | | 26 |
| 1972 | | | -21 | | | | | | |
| 1973 | | | | | -25 | | | | -17 |
| 1975 | 39 | | 34 | | | | | | |
| 1976 | -51 | -32 | -32 | -31 | -28 | -36 | -17 | -26 | -32 |
| 1977 | 69 | 52 | | | | 78 | 37 | | |
| 1978 | 59 | | | | | | | | |
| 1980 | 45 | | 37 | | | | | | 46 |
| 1982 | | | | 65 | | | | | 10 |
| 1983 | -39 | | | | | | | | -11 |
| 1984 | | | | | | | -26 | | 17 |
| 1985 | 56 | | | | | | 34 | | |
| 1986 | | | | | -26 | -31 | -33 | | |
| 1987 | | -77 | | | | 26 | 31 | | |
| 1988 | | 67 | | | | 31 | | | |
| 1989 | -39 | -27 | -25 | | | -20 | | | -23 |
| 1991 | | | | | | | | -19 | -27 |
| 1992 | | | | | | | | | 33 |
| 1993 | 50 | | 61 | | 48 | | 33 | | |
| 1994 | 35 | | | 31 | | | | | 39 |

Figure 2 - Années caractéristiques calculées pour le cerne complet (voir texte pour détails). Pour chaque espèce, les regroupements ont été définis suite à l'analyse des résultats de l'ACP suivie de la CAH effectuée sur les années caractéristiques (analyse non montrée). Pour chaque groupe, seules les années pour lesquelles au moins 50% des peuplements ont présenté un comportement particulier sont présentées dans ce tableau. Les lignes orange indiquent des années sèches et les lignes bleues des années à hiver froid. L'altitude, la réserve utile maximale (RUM) et les conditions climatiques moyennes (période 1961-1990) sont présentées. *: peuplements de l'Ouest de la France.

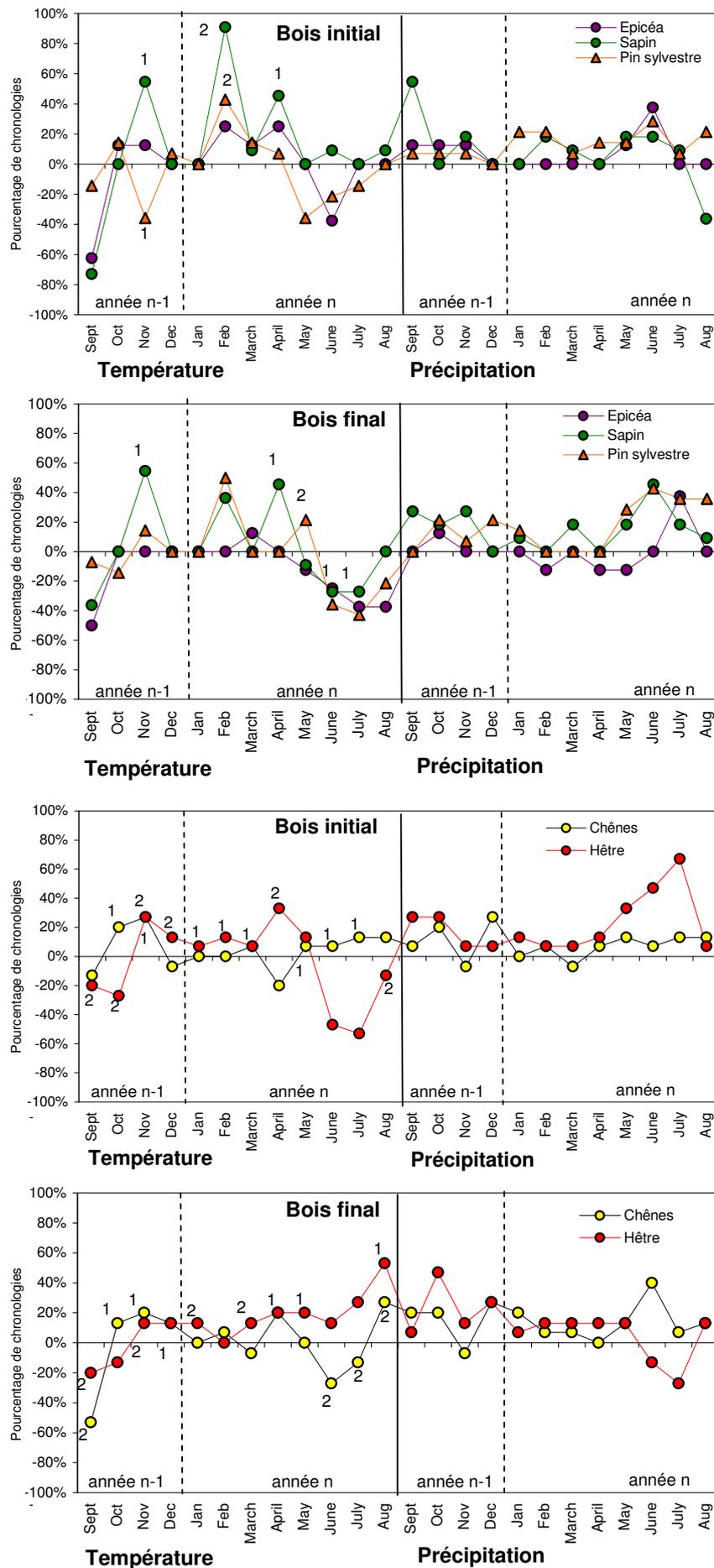


Figure 3 - Pourcentage de chronologies répondant aux variables mensuelles de température et de précipitation pour le bois initial et le bois final et pour les 5 espèces étudiées (coefficient de corrélations bootstrapped ; $p < 0,05$) : 100% = 8, 11, 14, 15 et 15 pour l'épicéa, le sapin pectiné, le pin sylvestre, le hêtre et les chênes (sessile, 11 sites et pédonculé, 4 sites). Température = Tmax sauf 1 = réponse significative pour Tmin et 2 = réponse pour Tmin ou Tmax selon les sites. Un pourcentage négatif indique un effet défavorable des valeurs élevées du paramètre sur la croissance.

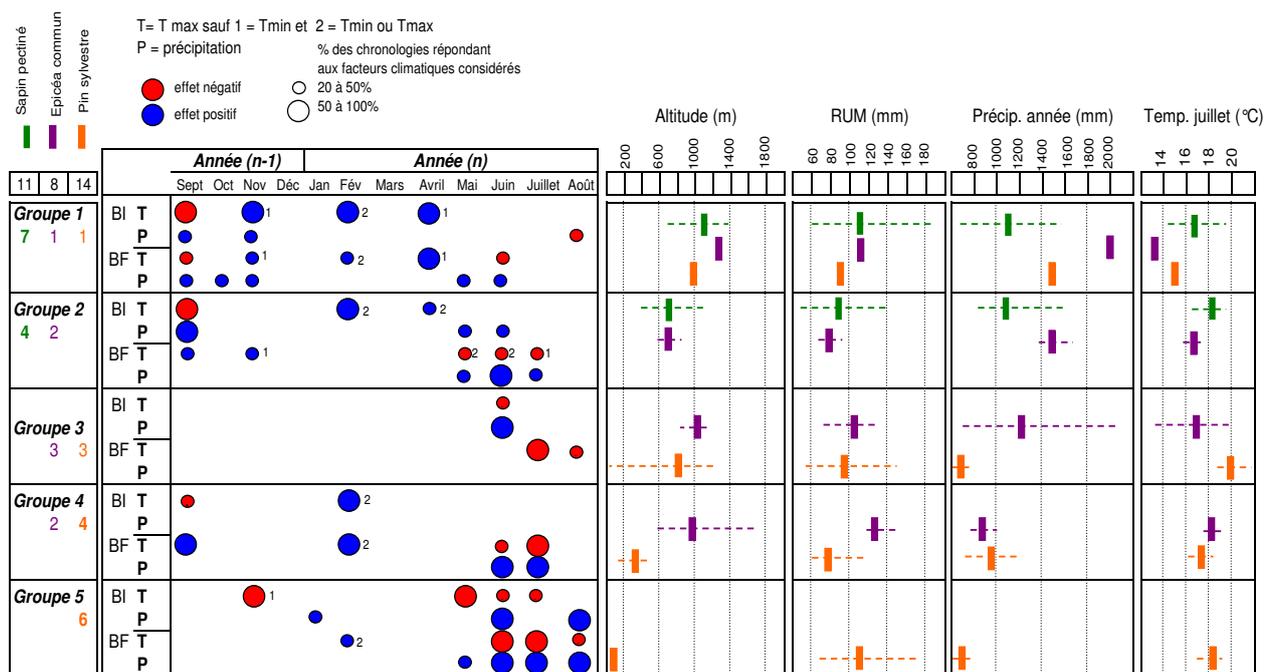


Figure 4 - Synthèse pour les résineux des réponses au climat pour le bois initial (BI) et le bois final (BF) pour chaque groupe défini suite à l'ACP-CAH effectuée sur les corrélations bootstrapped calculées sur le BI. Pour chaque groupe et chaque espèce, la valeur moyenne (barre verticale) et la gamme de variation (ligne pointillée) pour la RUM (mm), l'altitude (m), les précipitations annuelles (mm) et la température moyenne de juillet (°C) sont précisées.

Pour la grande majorité des sapinières étudiées, la mise en place du cerne dépend des conditions automnales de l'année précédente (rôle du bilan hydrique de septembre n-1) puis de la température de février dont les valeurs élevées favorisent la mise en place d'un cerne large. Pour les sapinières « fraîches et humides » d'altitude (altitude moyenne 1100 m ; RUM = 110 mm) (groupe 1), des températures élevées pendant le mois de novembre (n-1) et d'avril (n) favorisent également la croissance. Pour ces peuplements, le bilan hydrique du début d'été (juin) joue un rôle mineur sur la mise en place du bois final. En revanche pour les sapinières plus chaudes et sèches (RUM = 90 mm) d'altitude plus faible (moyenne 750 m) (groupe 2), la mise en place du bois final dépend très fortement du bilan hydrique de mai à juillet. Le modèle de réponse de l'épicéa est proche de celui du sapin mais la réponse est plus hétérogène entre les sites et sans logique stationnelle évidente. Ainsi, la mise en place du cerne dépend également des conditions automnales de l'année précédente à travers un effet négatif des fortes températures en sep-

tembre. Au cours de l'année, c'est le bilan hydrique de l'été qui intervient le plus souvent en modulant la croissance annuelle pour 40% des sites ; les températures hivernales jouent un rôle très secondaire. Pour le bois initial, la période clé est centrée sur juin alors que ce sont plutôt les mois de juillet et août qui gouvernent la largeur du bois final. Pour le pin sylvestre, la croissance dépend presque exclusivement des conditions climatiques de l'année en cours à travers le bilan hydrique au cours de la saison de végétation. Pour les pineraies de plaine poussant sur des sols à RUM moyennes (120 mm) sous climat plutôt océanique (P moyennes de 700 mm) (groupe 5), le bilan hydrique du début d'été (mai-juin) gouverne la croissance du bois initial et celui du milieu d'été (juin à août) celle du bois final. Pour les pineraies plus continentales ou montagnardes plus humides (P moyennes 970 mm) (groupe 4), la croissance dépend dans un premier temps des températures de fin d'hiver (février et mars) puis des précipitations de mai et juin.

CONCLUSIONS

D'une façon générale, le sapin, l'épicéa et les chênes sont les essences pour lesquelles la mise en place du bois initial dépend le plus fortement des conditions automnales de l'année précédente. Pour le sapin, cette réponse semble être une caractéristique forte de l'espèce car les mêmes résultats ont été observés dans la

sapinière vosgienne (Becker, 1989), jurassienne (Bert et Becker, 1990) et dans les Alpes (Desplanque *et al.*, 1999). En revanche, pour le hêtre et le pin sylvestre, la croissance du bois initial dépend essentiellement des conditions du début de saison de végétation. La largeur du bois final dépend plus fortement des conditions esti-

vales et principalement du bilan hydrique. Globalement, les effets des sécheresses sont d'autant plus forts que les conditions locales de xéricité augmentent : RUM < 100 mm pour le hêtre, à des altitudes inférieures à 800 m et/ou RUM < 100 mm pour le sapin, ou sous climat océanique de plaine peu arrosé (P de l'ordre de 700 mm) pour le pin sylvestre et les chênes. Pour les deux chênes, la différence de réponse aux fortes sécheresses n'est pas évidente mais la comparaison faite sur quelques peuplements est cohérente avec des travaux précédents montrant une sensibilité plus forte du chêne pédonculé (Lévy *et al.*, 1992) en liaison avec un fonctionnement physiologique différent (Cochard *et al.*, 1992). Pour le chêne sessile, une étude récente menée dans le nord de la France le long d'un gradient ouest-est confirme également une sensibilité accrue sous climat océanique (Pays de Loire notamment) en précisant également un seuil de sensibilité vis-à-vis de la RUM autour de 120 mm (Mérian, 2008). Concernant les froids hivernaux, les chênes apparaissent plus sensibles aux faibles températures que le hêtre ; résultat qui est en accord avec les connaissances écophysologiques

actuelles sur leur différence de sensibilité à l'embolie hivernale (Hacke et Sauter, 1996). Pour les résineux, à conditions stationnelles équivalentes, le sapin apparaît beaucoup plus thermophile que l'épicéa pour lequel les froids hivernaux intenses n'ont que très peu d'effet. Ce résultat est en accord avec une précédente étude menée dans les Alpes internes à des altitudes supérieures (Desplanque *et al.*, 1999). Dans le futur, une augmentation des pluies automnales et hivernales et un radoucissement hivernal (Déqué, 2007) pourraient donc influencer positivement la mise en place du bois initial. En revanche, une augmentation de la contrainte estivale pourrait réduire fortement la croissance du bois final. A plus ou moins long terme, ceci pourrait donc influencer les propriétés mécaniques du bois. En conclusion, même s'il est impossible de prédire avec certitude la dynamique future des écosystèmes forestiers dans le cadre de l'augmentation envisagée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, l'approche dendroécologique permet d'apporter des éléments de réponse quant au choix des stations à privilégier pour minimiser les risques de dysfonctionnement futur.

BIBLIOGRAPHIE

- BECKER M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1110-1117.
- BERT D., BECKER M., 1990. Vitalité actuelle et passée du sapin (*Abies alba* Mill) dans le Jura. Etude dendroécologique. *Annales des Sciences Forestières*, 47(5), 395-412.
- BIONDI F., WAIKUL K., 2004. Dendroclim2002: a c++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30, 303-311.
- BRÉTHES A., ULRICH E., 1997. RENECOFOR, Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, France, 573 p.
- COCHARD H., BRÉDA N., GRANIER A. AUSSÉNAC G., 1992. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). *Annales des Sciences Forestières*, 49, 225-233.
- COOK E.R., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Lamont-Doherty Geological Observatory, New York Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Tucson, AZ., 171 p.
- DÉQUÉ M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57:16-26
- DESPLANQUE C., ROLLAND C. SCHWEINGRUBER F.H., 1999. Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation: *Picea abies* and *Abies alba* in Tarentaise and Maurienne (French Alps). *Trees*, 13(4), 218-227.
- HACKE U., SAUTER J., 1996. Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia*, 105, 425-439.
- LEBOURGEOIS F., 1997. RENECOFOR - Etude dendro-chronologique des 102 peuplements du réseau. 307 p.
- LEBOURGEOIS F., 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, 57(2), 155-164.
- LEBOURGEOIS F., 2006. Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 53(1), 29-44.
- LEBOURGEOIS F., 2007. Climatic signal in annual growth variation of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) and Spruce (*Picea abies* Karst) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Annals of Forest Science*, 64, 333-343.
- LEBOURGEOIS F., BRÉDA N., ULRICH E. GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19(4), 385-401.
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C. ULRICH E., 2010. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, 21, 364-373.
- LÉVY G., BECKER M., DUHAMEL D., 1992. A comparison of the ecology of pedunculate and sessile oaks: radial growth in the centre and northwest of France. *Forest Ecology and Management*, 55, 51-63.
- MÉRIAN P., 2008. Dendroécologie du chêne sessile (*Quercus petraea*) dans la moitié Nord de la France. Master II, Fage, Université Nancy I, Henri-Poincaré, 38 p.
- SCHWEINGRUBER F.H., ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F. BRÄKER O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of even years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8(1), 9-38.



Figure hors-texte - Peuplement mélangé de cèdre et de pin noir du Mont-Ventoux (photo Lebourgeois, octobre 2009).

INFLUENCE DU STATUT SOCIAL DES ARBRES SUR LA DYNAMIQUE INTRA-ANNUELLE DE LA FORMATION DU BOIS

INFLUENCE OF TREE SOCIAL STATUS ON INTRA-ANNUAL DYNAMICS OF WOOD FORMATION

CYRILLE B. K. RATHGEBER

INRA, UMR1092, Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, F 54280 Champenoux.

Contact : cyrille.rathgeber@nancy.inra.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est de comprendre si les différences de croissance radiale observées en fonction du statut social, sont dues à des différences dans la durée de la formation du bois ou dans son intensité. Dans une plantation de sapins pectinés d'une quarantaine d'années, située près de Nancy, 3 x 5 arbres ont été sélectionnés selon leurs diamètres afin de représenter 3 classes de statut social – dominant, dominé et surcimé. En 2006, des échantillons de bois ont été prélevés chaque semaine de la saison de végétation sur le tronc des arbres sélectionnés. Des coupes histologiques ont été réalisées afin de permettre l'observation au microscope des cellules du cambium et du xylème. A partir de ces observations, le calendrier et la dynamique intra-annuelle de formation du bois ont été estimés. Nos résultats montrent que l'activité cambiale a commencé en premier pour les arbres dominants (fin avril), qui ont été suivis des dominés, puis des surcimés (début mai et mi-mai respectivement) ; elle a cessé en premier pour les surcimés (mi-août), suivis des dominés, puis des dominants (mi-septembre et fin septembre respectivement). Ainsi les dominants ont bénéficié d'une période de croissance plus longue que les dominés et les surcimés (5, 4 ½ et 2 ⅔ mois respectivement). De plus, les dominants présentaient un taux de production cellulaire plus élevé que les dominés et les surcimés (0,50, 0,20 et 0,16 cellules/jour, respectivement). L'intensité de la production cellulaire explique plus de 70 % de la variabilité du nombre final de cellules du cerne alors que la durée n'en explique que 30 %. Bien que l'intensité et la durée de la production agissent de concert, leurs régulations sont de natures différentes. En effet, alors que le début de la production est influencé par la hauteur de l'arbre, c'est la surface du houppier qui en détermine l'intensité.

MOTS-CLÉS : XYLÈME, CERNE DE CROISSANCE, CROISSANCE RADIALE, ACTIVITÉ CAMBIALE, SAPIN PECTINÉ, COMPÉTITION.

ABSTRACT

The objective of this paper is to understand if the observed differences in radial growth according to tree social status are due to differences in the duration of the growing period or in its intensity. In a 40-year-old silver fir plantation, located near Nancy in North-Eastern France, 3 x 5 trees were selected according to their diameter in order to represent 3 classes of social status – dominant, dominated and suppressed. In 2006, wood samples were collected weekly during the whole growing season on the stem of the selected trees. Histological sections were prepared in order to allow microscopic observations of cambium and xylem cells. From these observations, intra-annual wood formation timing and dynamics were assessed. Our results show that cambial activity started earlier for the dominant trees (end of April) than for the dominated and the suppressed (beginning of May and mid-May respectively); it stopped earlier for the suppressed (mid-August) than for the dominated and the dominants (end of September and mid-September respectively). So the dominants benefited from a much longer growing period than the dominated and the suppressed (5, 4 ½ and 2 ⅔ months respectively). Moreover, the dominants presented a much higher cell production rate than the dominated and the suppressed (0.50, 0.20 and 0.16 cell/day respectively). Cell production intensity explains over 70 % of the final ring cell number variation, while duration only explains 30% of it. Even if cell production intensity and duration act together, the processes behind their regulation are of different nature. Indeed, while cambium reactivation is influenced by tree height, it is crown area that determines cambial activity intensity.

KEYWORDS: XYLEM, TREE-RING, TREE RADIAL GROWTH, CAMBIUM ACTIVITY, ABIES ALBA, COMPETITION.

INTRODUCTION

Les peuplements forestiers, même les peuplements purs et réguliers, sont composés d'arbres de différentes tailles et de différents statuts sociaux. Cela peut se manifester au niveau de l'organisation du peuplement par des arbres de même âge qui présentent des diamètres variés. On sait que les arbres dominants sont plus gros que les arbres dominés car ils ont une croissance radiale systématiquement plus élevée au fil des années. L'objectif de cette étude est de comprendre si les différences de croissance observées sont attribuables au calendrier de production et de formation du xylème ou à l'intensité de ces processus.

Plusieurs études se sont récemment intéressées à la dynamique intra-annuelle de la formation des cernes de croissance chez les conifères (Rossi et Deslauriers, 2007). Dans ces études, l'activité cambiale et la formation du xylème ont été largement analysées en décrivant le calendrier, les durées et les taux de production et de différenciation cellulaire au cours de la saison de croissance (Deslauriers *et al.*, 2003 ; Rossi *et al.*, 2006b), et en reliant la formation des cernes de croissance avec des facteurs internes (Lachaud *et al.*, 1999 ; Savidge *et al.*, 2000 ; Wodzicki, 2001) ou externes (Wodzicki, 1971 ; Horacek *et al.*, 1999 ; Rossi *et al.*, 2007). La plupart de ces études se focalisent sur :

- l'influence des facteurs climatiques sur la dynamique intra-annuelle de croissance, sur l'ensemble de la saison de croissance ou une partie seulement (Wodzicki, 1971 ; Serre, 1976 ; Antonova et Stasova, 1993, 1997 ; Horacek *et al.*, 1999 ; Deslauriers et Morin, 2005 ; Gricar *et al.*, 2006 ; Rossi *et al.*, 2006c, 2007, 2008b, 2009b ; Deslauriers *et al.*, 2008 ; Seo *et al.*, 2008) ;
- l'influence des régulations hormonales sur l'activité cambiale durant une période particulière de l'année (Lachaud, 1989 ; Savidge, 1996 ; Uggla *et al.*, 2001).

Peu de travaux, cependant, abordent l'influence d'autres facteurs du milieu, comme la compétition entre les arbres (Linares *et al.*, 2009), ou d'autres facteurs endogènes comme l'âge ou la vitalité des arbres (Rossi *et al.*, 2008b, 2009a).

Les travaux précédents concernant l'influence du climat sur la dynamique de la croissance radiale des conifères des régions boréales et tempérées ont montré que l'initiation de l'activité cambiale est sans doute déclenchée au printemps par l'augmentation des températures (Rossi *et al.*, 2007, 2008a ; Seo *et al.*, 2008). L'influence du climat sur la cessation de l'activité cambiale en revanche est moins nette. Le taux de production cellulaire semble également, en partie, influencé par les températures (Antonova et Stasova, 1993, 1997 ; Horacek *et al.*, 1999). Pourtant, dans les régions froides, Rossi *et al.* (2006c) ont montré que la production maximale n'a pas lieu au moment où les températures sont les plus élevées, mais plus tôt dans la saison,

au solstice d'été, quand les jours sont les plus longs.

Rossi *et al.* (2008a) ont également montré que l'âge des arbres est un facteur important. En comparant des vieux arbres (200-350 ans) avec des jeunes (50-80 ans), ils ont pu observer que la production et la différenciation des cellules du xylème commençaient 2 à 3 semaines plus tard pour les vieux que pour les jeunes, pour finir un peu avant ou en même temps. Cela conduit à une réduction de 15 à 30% de la durée de l'activité cambiale et de la xylogénèse. Les vieux arbres présentaient, de plus, un taux de production cellulaire 2 à 3 fois faible que les jeunes. Ainsi, des périodes de production plus longues et des taux de production plus élevés permettaient aux jeunes arbres de produire 1,5 à 3 fois plus de trachéides que les vieux. Ces résultats sont en accord avec ceux de Gricar *et al.* (2005) qui ont montré que l'activité cambiale durait plus longtemps chez des sapins en bonne santé qui avaient des cernes de croissance larges que chez des individus dépérissants qui avaient des cernes étroits.

Linares *et al.* (2009) viennent de publier des résultats comparables sur des sapins méditerranéens en Espagne. Ces auteurs ont observé que l'augmentation de croissance des arbres d'un peuplement ayant subi une éclaircie est la conséquence d'une augmentation à la fois de la durée de la période de croissance et du taux de croissance. Dans cette étude, cependant, les auteurs attribuent l'augmentation de la durée de la période de croissance à un arrêt plus tardif de l'activité cambiale. Ils affirment, de plus, que la compétition n'a pas d'effet sur le démarrage de l'activité cambiale qui serait déterminé uniquement par l'augmentation des températures printanières.

Toutes ces études utilisent des arbres dominants sans tenir compte du fait que le statut social, en ayant une influence directe sur la taille des arbres, pourrait également avoir une forte influence sur la dynamique intra-annuelle de croissance et la formation du bois. Dans ce travail, 15 sapins pectinés ont été sélectionnés dans une plantation d'une quarantaine d'années, située près de Nancy, pour représenter équitablement 3 classes de statut social – dominant, dominé et surcimé. La dynamique intra-annuelle de la croissance radiale et de la formation du bois a été suivie en prélevant hebdomadairement des petits échantillons de bois, à hauteur de poitrine, sur le tronc des 15 arbres, durant la saison de végétation 2006. Des coupes histologiques ont été préparées à partir de ces échantillons afin de permettre l'observation au microscope des cellules du cambium et du xylème. À l'aide de ces observations, le calendrier de la formation du xylème ainsi que la dynamique de sa production ont été évalués.

Pour répondre à notre objectif initial de compréhension de la dynamique intra-annuelle de la croissance radiale et de la formation du bois en fonction du statut social, trois hypothèses ont été formulées à partir de la

littérature et testées à l'aide du jeu de données récolté, pour lequel les autres facteurs importants comme les conditions climatiques, les conditions stationnelles, ou encore l'âge des arbres sont fixés. (H1) Au début de la saison de végétation, l'activité cambiale commence en même temps pour tous les arbres, quel que soit leur statut social, car le démarrage de l'activité cambiale ne dépend que de la température de l'air. (H2) Au cours de la saison de végétation, le taux de production cellulaire est plus élevé chez les arbres dominants que chez les dominés et surcimés, car ils sont moins sensibles à la compétition exercée par leurs voisins. (H3) A la fin de la

saison de végétation, la xylogénèse cesse d'abord chez les arbres surcimés et dominés puis chez les dominants, car ces derniers ont un plus grand nombre de cellules à construire. D'autre part, les relations entre le nombre final de cellules d'un cerne et la durée ou le taux de production ont été analysées en détail, afin de déterminer lequel de ces deux facteurs est le plus important. Enfin, les relations entre le calendrier et le taux de production des trachéides d'une part, et les caractéristiques dendrométriques des arbres d'autre part, ont également été analysées afin de mieux comprendre les résultats obtenus.

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Site d'étude et sélection des arbres

Le peuplement étudié est localisé dans la forêt d'Amance (48.74°N, 6.32°E), à 270 m d'altitude sur un plateau calcaire situé près de Nancy, dans la région Lorraine (nord-est de la France). Il s'agit d'un peuplement pur et régulier de sapins pectinés (*Abies alba* Mill.) d'une quarantaine d'années. Les arbres ont été plantés en 1968 selon une grille de 2 x 2 m.

Trois classes de statut social – dominant, dominé et surcimé – ont été définies à l'aide d'une évaluation visuelle du statut de la couronne et d'un inventaire complet de toutes les tiges du peuplement dépassant 7 cm de diamètre à hauteur de poitrine (*DBH*). Les arbres dominants avaient un *DBH* supérieur à 28 cm, alors que les arbres surcimés avaient un *DBH* inférieur à 12 cm. Dans chaque classe, 5 sapins ont été sélectionnés aléatoirement et suivis durant toute la saison de végétation 2006. La hauteur totale de ces arbres (*H*) a été mesurée et la projection au sol de leurs houppiers (*Crown*) a été calculée.

2 - Echantillonnage des arbres et préparation des échantillons

Chaque semaine, du 23 mars au 6 décembre 2006, des échantillons de bois de 2 mm de diamètre et de 15 à 20 mm de long, appelé communément microcarottes, ont été prélevés sur les arbres suivis. Les prélèvements ont été effectués à hauteur de poitrine, à l'aide un poinçon spécifique : le Trephor® (Rossi *et al.*, 2006 a). Ils ont été répartis tous les 2 cm en suivant une spirale ascendante pour éviter les tissus cicatriciels et les canaux résinifères sans trop augmenter la variabilité liée au déplacement sur le tronc (Wodzicki et Zajackowski, 1970).

Les microcarottes ainsi collectées ont été placées dans des tubes Eppendorf remplis d'une solution d'éthanol à 50% et stockées à 5°C pour éviter la détérioration des tissus. Chaque échantillon a ensuite été orienté sous une loupe binoculaire et sa section

transverse a été marquée à l'aide d'un crayon à papier. Les microcarottes ont ensuite été nettoyées, déshydratées et infiltrées par immersions successives dans des bains d'éthanol, de D-limonène et de paraffine selon le procédé mis au point par Rossi *et al.* (2006 a). Les microcarottes ont enfin été incluses dans des blocs de paraffine puis coupées en section de 5 à 10 µm d'épaisseur à l'aide d'un microtome rotatif. Les sections ainsi obtenues ont été colorées à l'aide d'acétate de crésyl violet avant d'être fixées définitivement sur lame mince.

Pour chaque arbre suivi, une carotte standard (5 mm de diamètre) a également été prélevée à la tarière de Pressler, à proximité de la dernière microcarotte de la saison. Ces carottes ont ensuite été préparées au laboratoire selon une méthodologie standard afin de permettre la mesure des largeurs de cernes (*TRW*) par microdensitométrie (Polge, 1978 ; Mothe *et al.*, 1998).

3 - Observations microscopiques

Les sections transversales ont été observées en lumière blanche et polarisée, à un grossissement de 150 à 500 fois, afin de différencier les cellules du cambium et du xylème. Pour chaque échantillon, le nombre de cellules de la zone cambiale (*nC*), de la zone d'expansion des cellules (*nE*), de la zone d'épaississement et de lignification des parois (*nL*), et de la zone des cellules matures (*nM*), a été compté suivant trois files radiales, conformément à la méthode proposée par Rossi *et al.* (2006 b). En coupe transversale, les cellules cambiales sont de plus petite taille que les cellules en expansion. De plus, les fines parois des cellules cambiales et des cellules en expansion ne sont pas biréfringentes en lumière polarisée, contrairement aux parois en phase d'épaississement et de lignification. D'autre part, les parois en phase de lignification apparaissent violettes à l'intérieur et bleues à l'extérieur, alors que les parois des cellules matures sont uniformément bleues.

4 - Détermination du calendrier de la formation du xylème

Un jeu de 5 dates caractéristiques a été défini pour décrire le calendrier de formation du xylème. Les débuts des phases d'élargissement (t_iE), d'épaississement et lignification (t_iL), et mature (t_iM) ont été définis comme les dates auxquelles plus de 50 % des files radiales présentent, respectivement, au moins une première cellule en expansion, en épaississement, en lignification ou mature. Les fins des phases d'expansion (t_fE) et d'épaississement (t_fL) ont été définis comme les dates auxquelles plus de 50 % des files radiales présentent, respectivement, au maximum une dernière cellule en expansion ou en lignification. Ces dates ont permis de calculer la durée de 3 périodes caractéristiques de la formation du xylème. La durée des phases d'expansion (ΔtE) et d'épaississement et lignification (ΔtL) est le temps compris entre le début et la fin de ces phases. La durée totale de formation du xylème (ΔtX) est le temps compris entre le début de la phase d'expansion et la fin de la phase d'épaississement et lignification. Toutes ces variables ont été calculées automatiquement à partir des données brutes grâce à une fonction *ad hoc* écrite dans le langage de programmation statistique R (R Development Core Team, 2007 ; Rathgeber *et al.*, accepté). Dans ce travail, t_iE a été utilisé pour marquer le début de l'activité cambiale, de la croissance radiale et de la xylogénèse ; t_fE pour marquer la fin de l'activité cambiale et de la croissance radiale ; et t_fL pour marquer la fin de la xylogénèse.

5 - Description de la dynamique intra-annuelle de la production cellulaire

Afin de décrire la dynamique de production cellulaire une fonction de Gompertz a été ajustée aux données (Rossi *et al.*, 2003). La fonction de Gompertz est définie de la façon suivante :

$$nT(t) = A \cdot e^{-e^{-\beta \cdot t}} \quad (\text{éq. 1})$$

Où $nT(t)$ est le nombre total de cellules au temps t ($nT_t = nE_t + nL_t + nM_t$) ; A est l'asymptote horizontale de la courbe qui représente le nombre final de trachéides ; et β et κ sont des paramètres de la fonction qui ne sont pas directement interprétables d'un point de vue biologique. La fonction a été ajustée pour chaque arbre à l'aide de la procédure *nls()* de R (R Development Core Team, 2007). A partir des paramètres estimés, un taux de production cellulaire maximal (r_x) et un taux moyen (r_{90}) ont été calculés. Ce dernier prend en compte la production de 90 % des cellules, en excluant les 5 premiers et derniers pourcents, afin d'éviter les périodes où la fonction est mal adaptée.

$$r_x = \frac{\kappa \cdot A}{e} \quad (\text{éq. 2}) \quad \text{et} \quad r_{90} = \frac{0.9 \cdot \kappa \cdot A}{\ln(\ln(0.05)/\ln(0.95))} \approx 0.6 \cdot r_x \quad (\text{éq. 3})$$

6 - Modélisation du nombre final de cellules du cerne

Le nombre final de cellules du cerne (RCN) a été exprimé comme une fonction du taux moyen de production cellulaire (calculé à l'aide de la fonction de Gompertz) multiplié par la durée de production cellulaire (calculée à partir des observations) - $RCN = f(r_{90} \times \Delta tE)$. L'importance relative des ces deux variables dans le modèle a été évaluée en comparant leurs coefficients de variation relatifs.

II - RÉSULTATS

1 - Caractéristiques dendrométriques des arbres suivis

Les arbres qui ont été sélectionnés présentaient des caractéristiques dendrométriques très différentes en fonction de leur statut social. Les arbres dominants (D) avaient un diamètre (DBH) moyen de $56,80 \pm 2,48$ cm (1 erreur type, $n = 5$), alors que les arbres dominés (d) avaient un DBH de $34,09 \pm 0,38$ cm et les arbres surcimés (s) un DBH de $19,73 \pm 0,19$ cm.

Les différences observées sur les DBH se retrouvaient sur les largeurs de cernes (TRW) de l'année 2006, avec des valeurs moyennes allant de 1720 ± 511 à 556 ± 121 et 176 ± 29 μm pour D, d et s respectivement. Elles se retrouvaient également sur les nombres finaux de cellules des cernes (RCN) qui variaient en

moyenne de $49,8 \pm 10,3$ à $12,2 \pm 3,3$ et $7,49 \pm 1,2$ cellules pour D, d et s respectivement. Il est intéressant de noter que RCN et TRW apportent exactement la même information ($R^2 = 0,96$, $n = 15$), et que DBH et RCN sont, comme souhaité, très corrélés ($R^2 = 0,74$, $n = 15$).

Les trois groupes d'arbres présentaient également de fortes différences au niveau des hauteurs, qui variaient de $23,1 \pm 0,2$ m à $21,3 \pm 0,2$ m et $18,2 \pm 0,6$ m pour D, d et s respectivement. Ces différences étaient encore plus marquées au niveau des surface des houppiers, avec des valeurs allant de $16,74 \pm 2,29$ à $5,39 \pm 0,36$ et $3,15 \pm 0,12$ m^2 pour D, d et s respectivement.

La reconstruction des DBH sur la vie du peuplement à partir des largeurs de cernes a montré que l'organisation sociale du peuplement était stable au cours

des 20 dernières années. En effet, bien que des changements mineurs de classement soient visibles entre les arbres, aucun changement de classe n'est intervenu après 1985. De plus, comme les tendances de croissance des différents groupes étaient divergentes (augmentation rapide du *DBH* pour D, augmentation lente pour d et stagnation pour s), l'organisation sociale actuelle semblait définitive. Par contre, il n'était pas vraiment possible de faire des classes de diamètres distinctes avant 1985, car tous les arbres semblaient avoir le potentiel pour devenir dominants.

2 - Calendrier de la formation du bois

Le début de la phase d'élargissement des cellules du xylème s'étalait, en moyenne, du 29 avril \pm 3 jours pour D, au 8 mai \pm 2 jours pour d et au 21 mai \pm 2 jours pour s (Figure 1a, c et e). Ainsi, D commençait plus d'1 semaine avant d et plus de 3 semaines avant s. La fin de la phase d'élargissement s'étalait, en moyenne, du 24 septembre \pm 3 jours pour D, au 15 septembre \pm 3 jours pour d et au 7 août \pm 9 jours pour s. Ainsi, D finissait 1 semaine après d, et près d'1 mois et 3 semaines après s. La durée de la phase d'élargisse-

ment s'étendait donc, en moyenne, de 148 ± 4 jours pour D, à 130 ± 4 jours pour d, et 78 ± 11 jours pour s. Ainsi, pour D, ΔtE a duré presque 3 semaines de plus que pour d, et plus de 2 mois et 1 semaines de plus que pour s (Figure 1b, d et f).

Le début de la phase d'épaississement des parois cellulaires s'étalait, en moyenne, du 12 mai \pm 3 jours pour D, au 26 mai \pm 3 jours pour d, et au 29 juin \pm 10 jours pour s. Ainsi, D commençait plus de 2 semaines avant d, et presque 1 mois et 3 semaines avant s. La fin de la lignification s'étalait, en moyenne, du 22 octobre \pm 2 jours pour D, au 4 octobre \pm 3 jours pour d, et au 8 septembre \pm 18 jours pour s. Ainsi, D finissait 3 semaines après d, et 1 mois et 2 semaines après s. La durée de la phase d'épaississement et de lignification s'étendait donc, en moyenne, de 163 ± 2 jours pour D, à 131 ± 7 jours pour d, et 71 ± 14 jours pour s. Ainsi, pour D, ΔtL a duré plus d'1 mois de plus que pour d, et plus de 3 mois de plus que pour s.

Les premières trachéides matures sont apparues, en moyenne, autour du 1^{er} juin \pm 4 jours pour D, autour du 20 juin \pm 2 jours pour d, et autour du 12 juillet \pm 7 jours pour s. Pour D, elles sont ainsi apparues plus de 3 semaines avant d, et presque 1 mois et 1 semaine avant s.

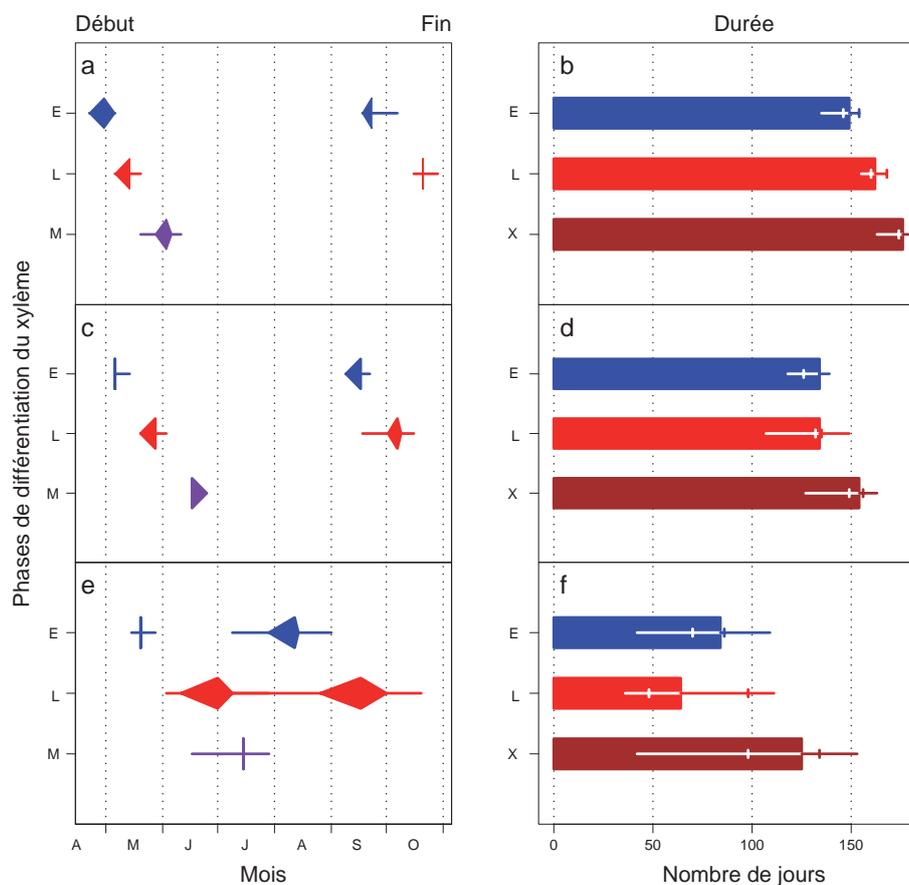


Figure 1 - Calendrier de formation du bois pour le sapin pectiné, dans le nord-est de la France, au cours la saison de végétation 2006. a et b : groupe des arbres dominants (D) ; c et d : arbres dominés (d) ; e et f : arbres surcimés (s). En ordonnée, les lettres indiquent les phases d'élargissement (E), de lignification (L) et matures (M), ainsi que l'ensemble de la formation du xylème (X).

La durée totale de formation du xylème s'étendait, en moyenne, de 175 ± 4 jours pour D, à 150 ± 6 jours pour d, et 110 ± 19 jours pour s. Ainsi, pour D, ΔtX a duré plus de 3 semaines de plus que pour d, et plus de 2 mois de plus que pour s.

3 - Dynamique intra-annuelle de la production cellulaire

Malgré des niveaux de production très variables d'un arbre à l'autre, l'ajustement de la fonction de Gompertz a donné des résultats convaincants, avec des R^2 allant de 0,73 à 0,99. Les fonctions de Gompertz ajustées reproduisaient parfaitement bien la phase dynamique de la production cellulaire, mais la forte variabilité circconférentielle, qui s'exprime principalement à la fin de saison de croissance, limite tout de même la qualité des ajustements (Figure 2).

Le taux maximal de production cellulaire variait, en moyenne, de $0,82 \pm 0,18$ cellules/jour pour D, à $0,33 \pm 0,02$ pour d, et $0,26 \pm 0,08$ pour s. Le taux moyen était lui de $0,50 \pm 0,11$ cellules/jour pour D, $0,20 \pm 0,01$ pour d, et $0,16 \pm 0,05$ pour s. Ainsi, les arbres dominants présentaient des taux de production cellulaire plus de

2 fois supérieurs à ceux des dominés et plus de 3 fois supérieurs à ceux des surcimés.

Tous les arbres ont atteint leur niveau maximal de production approximativement au même moment, début juin. Seuls 4 arbres surcimés ont atteint ce maximum plus tard dans la saison, fin juin ou début juillet. Ainsi, pour la plupart des arbres, le niveau de production était maximal durant la première partie de la saison de croissance, 3 semaines avant le solstice d'été.

4 - Modèle du nombre final de cellules du cerne

La relation entre RCN et r_x ou r_{90} était très forte et linéaire – avec un R_{adj}^2 de 0,71 (Figure 3 a) qui atteignait 0,90 quand 2 arbres au comportement plus discutable étaient enlevés (p -value = $6,59 \cdot 10^{-7}$, $n = 13$). Les relations entre RCN et t_iE , t_fE ou ΔtE sont assez fortes également, mais elles ne sont pas linéaires (Figure 3 b). Curieusement, t_iE était un meilleur prédicteur du RCN que ΔtE ou t_fE ($R_{adj}^2 = 0,64$, $0,41$ et $0,28$ et p -value = $2,13 \cdot 10^{-4}$, $6,28 \cdot 10^{-3}$, $2,45 \cdot 10^{-2}$, $n = 15$ pour t_iE , ΔtE et t_fE respectivement). Ceci bien que la variabilité est, comme on pouvait l'attendre, plus forte

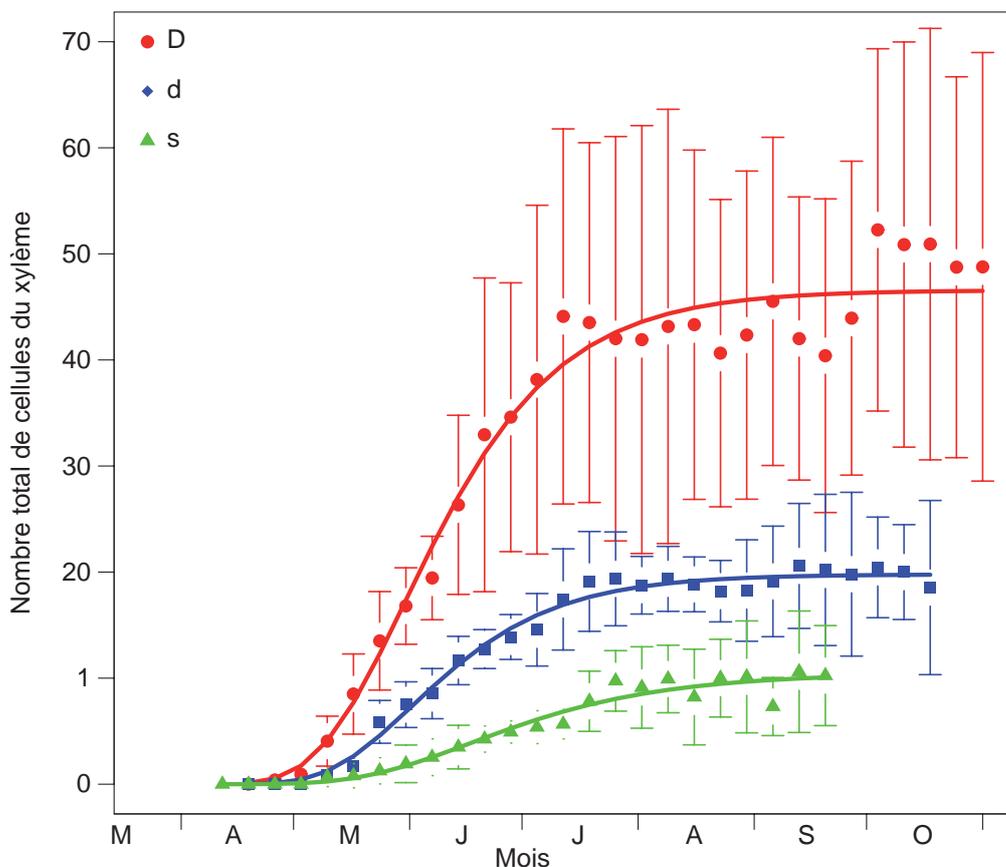


Figure 2 - Dynamique intra-annuelle de la production des cellules du xylème pour le sapin pectiné, dans le nord-est de la France, au cours de la saison de végétation 2006. D : dominants, $n = 5$; d : dominés, $n = 5$; s : surcimés, $n = 5$. Les points représentent la moyenne et les barres verticales représentent l'intervalle de confiance autour de la moyenne. Les courbes représentent l'ajustement par une fonction de Gompertz (D : $R^2 = 0,97$; d : $R^2 = 0,99$; s : $R^2 = 0,96$).

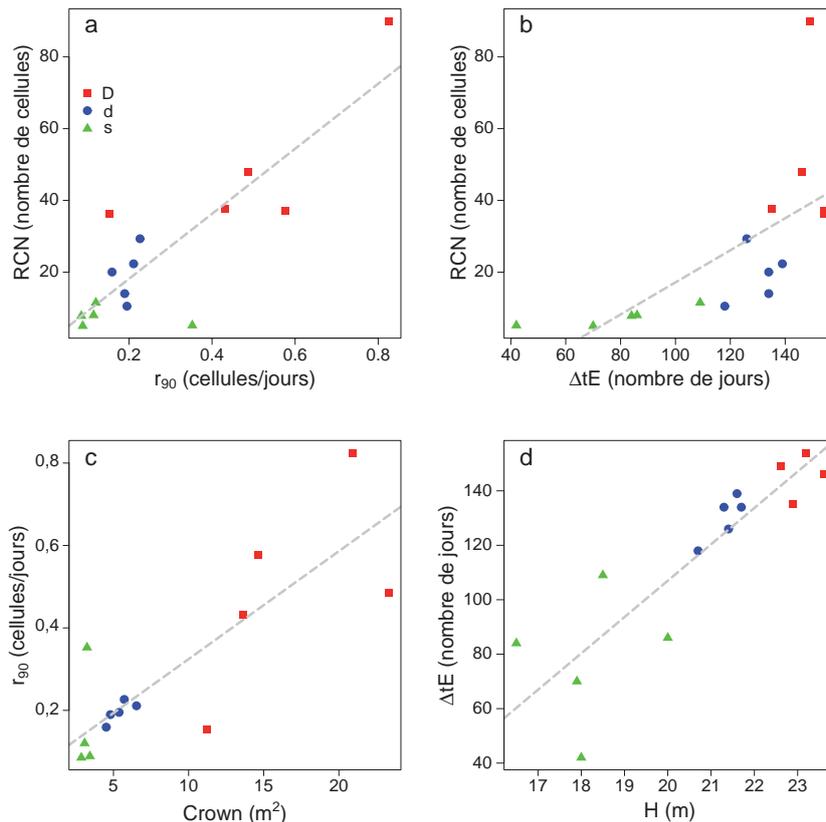


Figure 3 - Relations entre les caractéristiques dendrométriques des arbres et la dynamique intra-annuelle de la production des cellules du xylème pour le sapin pectiné, dans le nord-est de la France. Avec RCN : nombre final de cellules du cerne ; ΔtE : durée de la production ; r_{90} : taux de production moyen. Les lignes en tirés représentent les droites de régression, $n = 15$ pour a, b et d et 14 pour c.

pour ΔtE que pour t_fE , et t_fE ($cv = 0,29, 0,10$ et $0,08$ respectivement).

Le modèle complet, $RCN = f(r_{90} \times \Delta tE)$, représentait bien les observations puisqu'un R_{adj}^2 de 0,83 ($p\text{-value} = 1,39 \cdot 10^{-6}$) a été atteint. Ce modèle multiplicatif se prête mal à une partition de la variance, mais le calcul des coefficients de variation relatifs de r_{90} et ΔtE donne 75,84 et 28,48 % respectivement, ce qui indique que la variabilité de RCN dépend approximativement pour trois quarts de r_{90} et pour un quart seulement de ΔtE .

5 - Relations entre les caractéristiques dendrométriques et la dynamique intra-annuelle de croissance

La relation entre r_{90} et la surface du houppier ($Crown$) était très forte et linéaire ($R_{adj}^2 = 0,66$; $p\text{-value} = 2,45 \cdot 10^{-4}$; Figure 3c). Alors que la relation entre r_{90} et la hauteur de l'arbre (H) n'était pas aussi forte ($R_{adj}^2 = 0,27$; $p\text{-value} = 2,86 \cdot 10^{-2}$). La relation entre ΔtE et H était également très forte et linéaire ($R_{adj}^2 = 0,66$; $p\text{-value} = 2,45 \cdot 10^{-4}$; Figure 3d). Alors que la relation entre ΔtE et $Crown$ n'est pas aussi forte ($R_{adj}^2 = 0,35$; $p\text{-value} = 1,61 \cdot 10^{-2}$).

III - DISCUSSION

Cette étude a permis de montrer que le calendrier, les durées et les taux de production des cellules du xylème, changent en fonction du statut social des arbres, ce qui n'avait jamais été étudié auparavant. Notre première hypothèse – au début de la saison de végétation, l'activité cambiale commence en même temps pour tous les arbres du peuplement, car elle dépend uniquement de la température – est réfutée par nos résultats, qui montrent que les arbres dominants commencent l'élargissement des cellules du xylème avant les dominés et les surcimés. Notre deuxième hypothèse – au cours de la saison de végétation, le taux de production cellulaire est plus

élevé chez les arbres dominants car ils sont moins limités par la compétition que les arbres dominés et surcimés – est, en revanche, validée par nos résultats, qui montrent que les arbres dominants présentent des taux de production cellulaire supérieurs à ceux des dominés et des surcimés. Notre troisième hypothèse – à la fin de la saison de végétation, la xylogénèse cesse en premier chez les arbres surcimés et dominés puis chez les dominants car ces derniers ont plus de cellules à construire – est également validée par nos résultats, qui montrent que les arbres dominants finissent la lignification de leur parois cellulaires après les dominés et les surcimés.

Cette étude a également permis de montrer que le calendrier, les durées et les taux de formation du xylème n'agissent pas indépendamment mais en synergie. Les arbres dominants ont non seulement des phases de production et de développement qui commencent plus tôt, finissent plus tard et donc durent plus longtemps que les arbres dominés et surcimés, mais ils ont également des taux de production qui sont plus élevés. Cela rend difficile le classement de ces facteurs. Nous avons toutefois pu estimer que, pour cette étude, le nombre final de cellules produites au cours d'une saison de végétation est déterminé aux trois quarts par le taux de production cellulaire, et pour un quart seulement par la durée de la saison de végétation.

Dans ce travail, nous avons de plus cherché à évaluer l'influence des caractéristiques dendrométriques sur le calendrier, les durées et les taux de formation du xylème. D'une part, la durée de la période de croissance dépend de processus d'initiation et de cessation qui interviennent en début et fin de période de végétation lorsque les ressources, que ce soit la température ou la lumière, sont limitées. Ces processus devraient donc être sous l'influence de la « capacité de prospection » de l'arbre qui pourrait être illustrée tout simplement par sa hauteur. Ce raisonnement nous permet de formuler l'hypothèse suivante : (H4) le début de l'activité cambiale est sous le contrôle de la hauteur de l'arbre. Cette hypothèse est validée par nos résultats qui montrent une bonne relation entre hauteur de l'arbre et début de la phase d'élargissement des cellules du xylème. D'autre part, le taux de production cellulaire est maximal au tiers de la période de croissance environ lorsque les ressources, que ce soit la température, la lumière ou encore l'eau, sont abondantes. De plus, nous savons par ailleurs qu'à cause de la forme sigmoïde des courbes de croissance, les taux de production moyen et maximum sont équivalents, à un facteur multiplicatif près (voir éq. 3). Le taux de production cellulaire devrait donc être sous l'influence de la « capacité d'échange » de l'arbre, qui pourrait être illustrée par la surface du houppier. Ce raisonnement nous amène à formuler l'hypothèse suivante : (H5) le taux de production cellulaire est sous le contrôle de la surface du houppier. Cette hypothèse est également validée par nos résultats qui montrent une relation très forte entre surface du houppier et taux de production cellulaire.

Nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature concernant la dynamique intra-annuelle de la formation du xylème, qui montrent unanimement que des cernes plus larges (c'est-à-dire comportant un plus grand nombre de cellules) correspondent à des taux de production cellulaires plus élevés ; et ce, quelle que soit la cause de cette différence : climat (Deslauriers *et al.*, 2007 ; Rossi *et al.*, 2007), vitalité (Gricar *et al.*, 2005), âge (Rossi *et al.*, 2008a), compétition (Linares *et al.*, 2009) ou statut social ici. Nos résultats sont également en accord avec ceux des travaux précédents (Gricar *et*

al., 2005 ; Rossi *et al.*, 2008a ; Linares *et al.*, 2009) qui montrent généralement qu'un plus grand nombre de cellules produites durant la saison de végétation correspond à une fin plus tardive de la lignification des parois des trachéides en maturation, c'est-à-dire de la xylogénèse. Nos résultats, en revanche, contrairement à l'affirmation de Linares *et al.* (2009) sur laquelle nous avons basé notre première hypothèse, montrent bien que des cernes plus larges correspondent également à un début d'activité cambiale plus précoce comme l'observaient Rossi *et al.* (2008a) ; et ce, y compris au sein d'un même peuplement.

Ceci ne remet pas en cause l'idée largement répandue que le début de l'activité cambiale est contrôlé par la hausse des températures printanières (Rossi *et al.*, 2007, 2008b ; Seo *et al.*, 2008), mais la nuance tout de même, puisque nous montrons que des arbres d'une même espèce poussant au sein d'un même peuplement, et donc soumis au même climat, peuvent présenter des démarrages décalés dans le temps. Ces décalages sont-ils dus à des sensibilités différentes des arbres à un même stimulus climatique homogène au sein du peuplement, ou bien chaque arbre est-il influencé par un stimulus particulier, microclimatique, qui n'aurait d'homogène que l'apparence ? Le fait d'avoir montré qu'il y avait une bonne relation entre la hauteur de l'arbre et le début de l'activité cambiale laisse penser que la hausse des températures au printemps ne touche pas tous les arbres en même temps. Cela pourrait s'expliquer par le fait que plus les arbres sont hauts par rapport à leurs concurrents, plus ils sont réchauffés tôt le matin et tard le soir par les rayons du soleil et profitent donc plus précocement de la hausse des températures au printemps. Cette explication, cependant, ne nous paraît pas complètement satisfaisante, car c'est en premier lieu la compétition pour la lumière qui est le moteur principal et bien connu de la croissance en hauteur des arbres. C'est donc probablement la quantité de lumière reçue en début de saison, plus que la somme des températures cumulées, qui avantage les grands arbres d'un peuplement par rapport aux petits. Il semble donc probable que l'augmentation de la photopériode diurne s'ajoute à la hausse des températures pour contrôler le démarrage de l'activité cambiale. Des investigations plus poussées seront nécessaires pour confirmer (ou infirmer) cette proposition. Ce qui nous semble certain en revanche, c'est que les facteurs environnementaux n'agissent pas à l'échelle du peuplement, mais bien à l'échelle de l'individu ; et que le peuplement, même lorsqu'il s'agit d'un peuplement homogène et régulier est un « filtre » suffisant pour que les arbres soient influencés individuellement et de façon différenciée par les facteurs environnementaux.

Nos résultats montrent qu'il y a un décalage dans le début et la fin de la croissance radiale en fonction du statut social et de la taille des arbres, mais que le maximum de croissance intervient, par contre, au même

moment pour tous les arbres – sauf pour les arbres qui sont vraiment à la limite de la survie. Cela signifie que tous les arbres ne devraient pas être touchés de la même façon par les événements climatiques du début ou de la fin de la saison de végétation (gelées tardives au printemps ou précoces à l'automne par exemple) puisque certains sont actifs alors que d'autres sont au repos. Ils devraient en revanche tous être touchés de façon très semblable (moyennant leur sensibilité individuelle) par les événements climatiques ayant lieu au milieu de la période de croissance (sécheresse édaphique par exemple). Ce constat peut être appliqué à l'impact des changements climatiques qui ne vont pas seulement

consister en une hausse homogène des températures ou des précipitations mais également en une modification de leurs rythmes saisonniers.

Bien que nos résultats ne portent que sur 15 individus et une seule année de suivi, ils sont si peu équivoques que nous plaçons une grande confiance en eux. Il sera néanmoins intéressant de les confirmer à la fois sur plusieurs années de suivi, pour prendre en compte des années climatiquement contrastées, et sur plusieurs espèces, pour prendre en compte différentes stratégies physiologiques (hêtres ou chênes – feuilles décidues) ou écologiques (pins ou bouleaux – comportement de pionniers).

CONCLUSION

Cette étude concernant la dynamique intra-annuelle de la formation du bois, chez le sapin pectiné dans le nord-est de la France, a permis de montrer que le calendrier, les durées et les taux de production des cellules du xylème changent en fonction du statut social des arbres, ce qui n'avait jamais été présenté auparavant. L'activité cambiale commence plus précocement chez les arbres dominants que chez les arbres dominés et surcimés (29 avril, 8 mai et 21 mai respectivement en moyenne) pour terminer plus tard (24 septembre, 15 septembre et 7 août respectivement en moyenne) et ainsi durer plus longtemps (5 mois, 4 mois $\frac{1}{3}$ et 2 mois $\frac{2}{3}$ respectivement en moyenne). Il en va de même pour toutes les étapes de la xylogénèse. De plus, au cours de la saison de végétation, l'activité cambiale est plus intense chez les arbres dominants que chez les dominés et les surcimés – les arbres dominants ont un taux de production cellulaire 2 fois supérieur à celui des dominés et 3 fois supérieur à celui des surcimés. Bien que la durée et l'intensité de l'activité cambiale agissent de concert pour que les arbres dominants forment des cernes de croissance plus larges (c'est-à-dire contenant un plus grand nombre de cellules) que les

dominés et les surcimés, nous avons estimé que l'intensité contribuait pour $\frac{3}{4}$, et la durée pour $\frac{1}{4}$ seulement, au résultat final. Nous avons pu montrer également que la durée de l'activité cambiale était influencée par la hauteur des arbres, qui renseigne sur la capacité de ces derniers à profiter de l'augmentation des températures et de la lumière au printemps ; alors que son intensité était influencée par la surface des houppiers, qui renseigne sur la capacité photosynthétique des arbres en condition normale durant la saison de végétation. Cela illustre bien l'idée que les conditions environnementales influencent l'activité de chaque individu au sein d'une population de façon particulière, en fonction des caractéristiques à la fois de l'individu et de la population. Cette étude nous permet de penser que les changements climatiques vont affecter différemment les arbres d'un peuplement en fonction de leur statut social et ainsi potentiellement modifier la structure de ce peuplement. La poursuite de ces investigations à travers la prise en compte plus détaillée des différentes étapes de la formation du xylème, de la structure anatomique des cernes de croissance, et d'un plus grand nombre d'années, devrait permettre d'explorer cette piste de travail.

Remerciements

Nous remercions Emmanuel Cornu, Etienne Farré, Pierre Gelhaye et Alain Mercanti qui ont effectué le travail de terrain, ainsi que Maryline Harroué qui a préparé la plupart des échantillons au laboratoire. Nous remercions également Sergio Rossi, Annie Deslauriers et Jozica Gricar pour leurs conseils concernant la préparation et l'observation des échantillons. Nous remercions enfin Fleur Longuetaud et Jean-Daniel Bontemps pour leurs conseils concernant l'analyse des données et Joëlle Kivits pour sa relecture attentive du manuscrit.

Ces travaux sont financés par la Région Lorraine et l'INRA à travers plusieurs projets de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTONOVA G.F., STASOVA V.V., 1993. Effects of environmental factors on wood formation in scots pine stems. *Trees-Structure and Function*, 7, 214-219.
- ANTONOVA G.F., STASOVA V.V., 1997. Effects of environmental factors on wood formation in larch (*Larix sibirica* Ldb.) stems. *Trees-Structure and Function*, 11, 462-468.
- DESLAURIERS A., ANFODILLO T., ROSSI S., CARRARO V., 2007. Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees. *Tree Physiology*, 27, 1125-1136.
- DESLAURIERS A., MORIN H., 2005. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables. *Trees-Structure and Function*, 19, 402-408.
- DESLAURIERS A., MORIN H., BEGIN Y., 2003. Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* in the Quebec boreal forest (Canada). *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 190-200.
- DESLAURIERS A., ROSSI S., ANFODILLO T., SARACINO A., 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology*, 28, 863-871.
- GRICAR J., CUFAR K., OVEN P., SCHMITT U., 2005. Differentiation of terminal latewood tracheids in silver fir trees during autumn. *Annals of Botany*, 95, 959-965.
- GRICAR J., ZUPANCIC M., CUFAR K., KOCH G., SCHMITT U., OVEN P., 2006. Effect of local heating and cooling on cambial activity and cell differentiation in the stem of Norway spruce (*Picea abies*). *Annals of Botany*, 97, 943-951.
- HORACEK P., SLEZINGEROVA J., GANDELOVA L., 1999. Effect of environment on the xylogenesis of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects. R. Wimmer, Vetter R.E. Oxon, New-York, CABI Publishing: 33-53.
- LACHAUD S., 1989. Some aspects of phytohormonal participation in the control of cambial activity and xylogenesis in tree stems. *Annales des Sciences Forestieres*, 46, S273-S276.
- LACHAUD S., CATESSON A.M., BONNEMAIN J.L., 1999. Structure and functions of the vascular cambium. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Série III-Sciences de la Vie*, 322, 633-650.
- LINARES J.C., CAMARERO J.J., CARREIRA J.A., 2009. Plastic responses of *Abies pinsapo* xylogenesis to drought and competition. *Tree Physiology*, 29, 1525-1536.
- MOTHE F., DUCHANOIS G., ZANNIER B., LEBAN J.M., 1998. Microdensitometric analysis of wood samples: data computation method used at Inra-ERQB (CERD program). *Annales des Sciences Forestieres*, 55, 301-313.
- POLGE H., 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science and Technology*, 12, 187-196.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2007. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- RATHGEBER C.B.K., LONGUETAUD F., MOTHE F., LE MOGUÉDEC G., accepté. Phenology of wood formation: data processing, analysis and visualisation using R (package CAVIAR). *Dendrochronologia*.
- ROSSI S., ANFODILLO T., MENARDI R., 2006a. Trephor: A new tool for sampling microcores from tree stems. *Iawa Journal*, 27, 89-97.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., 2007. Intra-annual time scales in tree rings. *Dendrochronologia*, 25, 75-77.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., 2006b. Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: An example at the alpine timberline. *Iawa Journal*, 27, 383-394.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., CARRARO V., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152, 1-12.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., CARRER M., 2008a. Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytologist*, 177, 199-208.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., MORIN H., SARACINO A., MOTTA R., BORGHETTI M., 2006c. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 170, 301-310.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., GRICAR J., SEO J.W., RATHGEBER C.B.K., ANFODILLO T., MORIN H., LEVANIC T., OVEN P., JALKANEN R., 2008b. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 696-707.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., MORIN H., 2003. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia*, 21, 33-39.
- ROSSI S., SIMARD S., DESLAURIERS A., MORIN H., 2009a. Wood formation in *Abies balsamea* seedlings subjected to artificial defoliation. *Tree Physiology*, 29, 551-558.
- ROSSI S., SIMARD S., RATHGEBER C.B.K., DESLAURIERS A., DE ZAN C., 2009b. Effects of a 20-day-long dry period on cambial and apical meristem growth in *Abies balsamea* seedlings. *Trees-Structure and Function*, 23, 85-93.
- SAVIDGE R.A., 1996. Xylogenesis, genetic and environmental regulation - A review. *Iawa Journal*, 17, 269-310.
- SAVIDGE R.A., BARNETT J.R., NAPIER R., Eds. (2000). Cell and molecular biology of wood formation. Experimental Biology Reviews. Oxford, BIOS.
- SEO J.W., ECKSTEIN D., JALKANEN R., RICKEBUSCH S., SCHMITT U., 2008. Estimating the onset of cambial activity in Scots pine in northern Finland by means of the heat-sum approach. *Tree Physiology*, 28, 105-112.
- SERRE F., 1976. Relations between tree growth and climate in Aleppo pines (*Pinus halepensis* Mill.). 1. Methods - cambial activity and climate. *Oecologia Plantarum*, 11, 143-171.
- UGGLA C., MAGEL E., MORITZ T., SUNDBERG B., 2001. Function and dynamics of auxin and carbohydrates during earlywood/latewood transition in Scots pine. *Plant Physiology*, 125, 2029-2039.
- WODZICKI T.J., 1971. Mechanism of xylem differentiation in *Pinus sylvestris* L. *Journal of Experimental Botany*, 22, 670-687.
- WODZICKI T.J., 2001. Natural factors affecting wood structure. *Wood Science and Technology*, 35, 5-26.
- WODZICKI T.J., ZAJACZKOWSKI S., 1970. Methodical problems in studies on seasonal production of cambial xylem derivatives. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, XXXIX, 509-520.

DÉTERMINISME CLIMATIQUE DES ANNÉES DE CROISSANCE EXTRÊME CHEZ LE CHÊNE SESSILE DANS LA MOITIÉ NORD DE LA FRANCE

*EXTREME TREE-RINGS IN SESSILE OAK
IN NORTHERN FRANCE: A DENDROCLIMATIC APPROACH*

PIERRE MÉRIAN¹, JEAN-DANIEL BONTEMPS¹, LAURENT BERGÈS², FRANÇOIS LEBOURGEOIS¹

¹ *AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB),
ENGREF, 14 rue Girardet, F 54000 Nancy.*

² *Cemagref, Unité Écosystèmes Forestiers, Domaine des Barres, F 45290 Nogent-sur-Vernisson.*

Contact : pierre.merian@engref.agroparistech.fr

RÉSUMÉ

La réponse du chêne sessile aux événements climatiques extrêmes a été étudiée entre 1914 et 1993 au travers de l'analyse des croissances extrêmes, appelées années caractéristiques. Pour cela, 31 peuplements purs et adultes de chêne sessile ont été échantillonnés dans la moitié nord de la France (720 arbres) afin de couvrir une gamme de conditions climatiques variées (océanique à semi-continentale). L'analyse montre que, pour l'ensemble des sites, les années de croissance extrême dépendent fortement des conditions hydriques et thermiques estivales (mai à juillet), les années de faible croissance correspondant à des conditions chaudes et sèches (1921, 1976, 1989). La croissance est également plus faible lors des grands froids hivernaux (1956).

L'étude des années caractéristiques a permis de mettre en évidence une structuration spatiale de la réponse aux événements extrêmes, avec la distinction de 2 grandes régions dans la moitié nord de la France : les sites de l'ouest (de la Bretagne à la Champagne) sous climat océanique, avec une fréquence décennale d'années caractéristiques voisine de 0,2 et fortement dépendante de l'indice de De Martonne estival, et les sites de l'est (Lorraine, Alsace, Franche-Comté) avec une fréquence décennale plus élevée (environ 0,3) et un déterminisme climatique plus flou, dépendant à la fois des conditions estivales et hivernales.

MOTS-CLÉS : ANNÉES CARACTÉRISTIQUES, DENDROCLIMATOLOGIE, CHÊNE SESSILE, FROIDS HIVERNAUX, SÉCHERESSE ESTIVALE.

ABSTRACT

The growth response of sessile oak to extreme climatic years has been investigated from 1914 to 1993 using extreme years growth, i.e. pointer years. 31 mature and pure stands were cored in northern France (720 trees), under varied climates, from oceanic to semi-continental conditions. The analysis has highlighted similarities in growth characteristics throughout the study area : abrupt growth changes depend mainly on summer temperatures and precipitations (from May to July), narrow rings generally correlate with warm and dry climate (1921, 1976, 1989). Narrow rings also occur with strong winter frosts (1956).

Pointer years analysis has allowed to define 2 main regions in northern France, with specific responses to extreme climatic events: plots in north-western France (from Brittany to Champagne) under oceanic climate, with a decennial pointer years frequency around 0,2 strongly correlated with summer De Martonne Index, and plots in north-east France (Lorraine, Alsace, Franche-Comté) under semi-continental climate, with higher frequency (around 0,3), depending on both summer and winter conditions.

KEYWORDS: POINTER YEARS, DENDROCLIMATOLOGY, SESSILE OAK, SUMMER DROUGHT, WINTER FROSTS.

INTRODUCTION

Les relations entre la croissance radiale et le climat peuvent être étudiées selon deux méthodes complémentaires. Le calcul des fonctions de réponse permet de mettre en évidence les facteurs climatiques expliquant la réponse moyenne au climat (Guiot 1991). L'analyse des croissances extrêmes, appelées années caractéristiques (AC), permet quant à elle de mettre en évidence la réponse des arbres aux événements climatiques particuliers et peu fréquents (Fritts, 1976 ; Schweingruber, 1990). Dans le contexte des changements globaux, l'analyse des effets de ces années particulières sur les peuplements forestiers apparaît comme un enjeu majeur. En effet, de nombreuses études (suite notamment aux sécheresses de 1976 ou 2003) ont montré que des vagues de chaleur ou des sécheresses intenses étaient à l'origine de dysfonctionnements forestiers pouvant aboutir à la mort des arbres (Leuzinger *et al.*, 2005 ; Pichler et Oberhuber, 2007 ; Bréda et Badeau, 2008). Les modèles climatiques prédisant une augmentation de la durée et de l'intensité des sécheresses estivales (Déqué, 2007 ; Planton *et al.*, 2008), nous pouvons supposer que les épisodes de forte sécheresse du XX^e siècle correspondront à des années « normales » d'ici quelques décennies.

Dans la moitié Nord de la France, le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) est une des principales essences forestières, aussi bien en surface qu'en valeur économique (IFN, 2007). Même si les chênes sont parmi les espèces les plus étudiées en Europe, les travaux en France sont rares et limités dans l'espace (massif forestier) et dans le temps (Becker *et al.*, 1994 ; Tessier *et al.*, 1994 ; Bréda, 1998 ; Lebourgeois *et al.*, 2004 ; Bergès *et al.*, 2005). Ces études ne permettent pas d'avoir une vision de la sensibilité aux événements climatiques extrêmes à grande échelle, i.e. sous climats contrastés et sur l'ensemble du XX^e siècle. Afin de répondre à cette question, trois jeux de données ont été regroupés pour obtenir 31 sites répartis dans la moitié nord de la France (Lebourgeois, 1997 ; Bergès *et al.*, 2005 ; Bontemps, 2006). Ces sites couvrent une vaste gamme de conditions climatiques (océanique à semi-continentale), et permettent une analyse rétrospective sur une période commune de 80 ans (1914-1993). Les objectifs sont d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des années caractéristiques, de définir les paramètres climatiques influents, et de mettre en évidence les effets des conditions locales sur la réponse aux événements extrêmes.

I - MATÉRIELS ET MÉTHODES

1 - Description des sites

Un total de 31 sites a été échantillonné dans la moitié nord de la France (Figure 1, Figure 3). Les peuplements sont des futaies régulières adultes de plaine dont l'âge moyen en 1993 était compris entre 76 et 143 ans. Le climat varie d'un climat océanique doux à l'ouest à un climat semi-continentale froid et plus arrosé à l'est. Une analyse pédologique a permis de préciser le contexte stationnel par la mesure du pH de l'horizon organo-minéral A (pHA) et le calcul de la Réserve Utile Maximale en eau (RUM). La RUM a été estimée sur une profondeur d'un mètre en prenant en compte, pour chaque horizon, la texture (Bruand *et al.*, 2003), la charge en éléments grossiers et l'épaisseur de l'horizon. Le pHA varie de 4,1 à 5,1 et la RUM de 56 à 171 mm (Figure 3).

2 - Mesures des largeurs de cerne et calcul des années caractéristiques

Les 720 arbres dominants ont été carottés (entre 1994 et 2004) jusqu'à la moelle à une hauteur de 1,30 m à l'aide d'une tarière de Pressler (une carotte par arbre, 14 à 30 arbres par peuplement) (Figure 2A,B). Les 77 000 cernes ont été mesurés avec une précision de 1/100 mm à l'aide d'un système vidéo-informatisé

spécifique (Becker, non publié) (Figure 2C, D). Après mesure, les séries individuelles ont été interdatées à l'aide d'années caractéristiques calculées, sur chaque site, selon la méthode proposée par Becker (Becker, 1989). Une année est considérée comme caractéristique lorsqu'au moins 75% des arbres d'un peuplement présentent le même signe de changement de croissance et une variation absolue de largeur de cerne supérieure à 10% de la largeur du cerne de l'année précédente. Le pourcentage de variation est appelé Écart Relatif Moyen (ERM). Un ERM positif correspond ainsi à une année où le cerne est au moins 10% plus large que celui de l'année précédente.

3 - Données climatiques

Les données météorologiques sont issues du modèle spatialisé Tyndall qui fournit des séries climatiques homogènes sur l'ensemble du XX^e siècle à une résolution spatiale de 15 km (Mitchell *et al.*, 2004). Ainsi, pour chaque site et pour chaque mois entre 1914 et 1993, nous disposons des précipitations (P) et des températures moyennes (Tm). Comme indicateur du niveau de stress hydrique estival, l'indice d'aridité de De Martonne a été calculé sur la période de mai à juillet (De Martonne été) (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

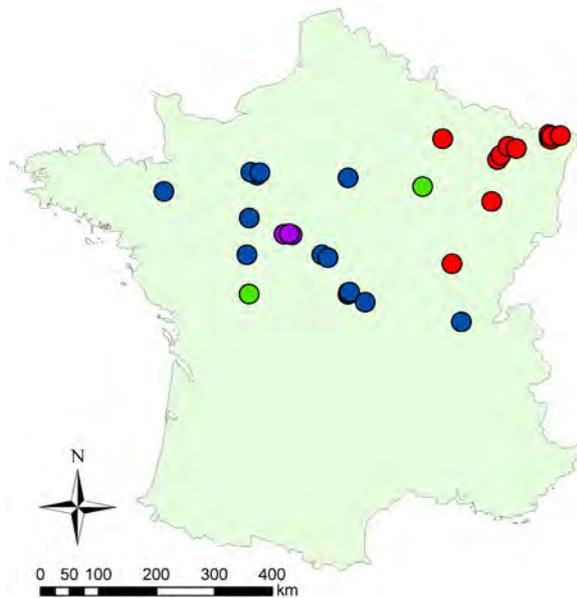


Figure 1 - Localisation géographique des 31 peuplements purs de chêne sessile. Les couleurs correspondent aux 4 groupes définis par la classification ascendante hiérarchique. Bleu : groupe 1 ; rouge : groupe 2 ; vert : groupe 3 ; violet : groupe 4.

4 - Analyses statistiques sur les années caractéristiques

Afin de mettre en évidence des similitudes de réponse aux extrêmes climatiques entre les sites, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur les ERM des années caractéristiques, la valeur 0 ayant été attribuée aux années non caractéristiques. Les 31 sites ont été regroupés au moyen d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH - métrique : Euclidien ; algorithme de hiérarchie : Ward) réalisée sur les coor-

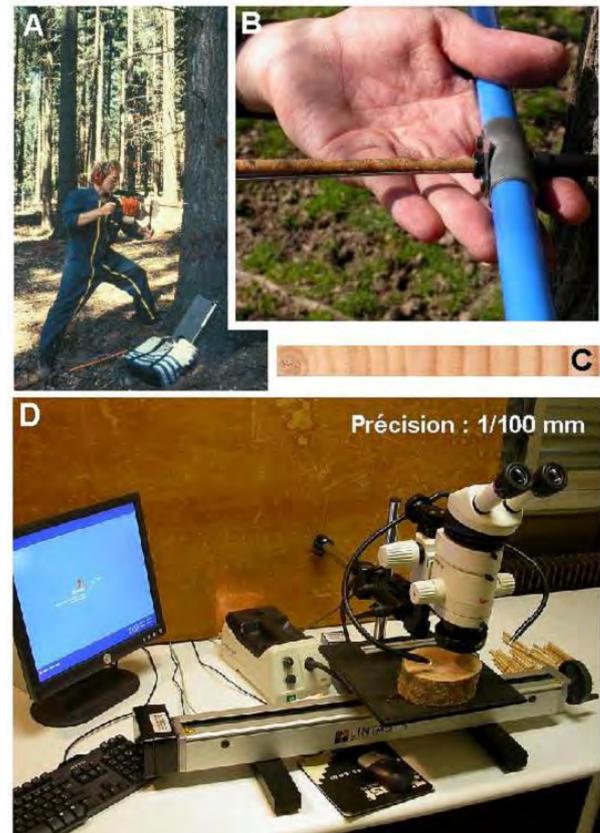


Figure 2 - Récolte des échantillons de bois et lecture des largeurs de cerne. A : Carottage manuel à la tarière de Pressler (source : <http://efdp.nancy-engref.inra.fr/perso/flb.htm>). B : Extraction d'une carotte de la tarière de Pressler (© J. Willm 2007). C : Préparation des carottes pour la lecture microscopique (planage) (© P. Mérian 2009). D : Exemple de ban dendrométrique de lecture de largeur de cerne, utilisé à DYNAFOR (© L. Burnel 2007).

données factorielles des deux premiers axes de l'ACP. L'ensemble des traitements statistiques a été fait à l'aide du logiciel Splus 2000.

II - RÉSULTATS

1 - Sensibilité générale aux événements extrêmes

Sur la période 1914-1993, le nombre d'années caractéristiques (AC) par site a été en moyenne de 28 (min : 16 ; max : 40), soit environ 35 % (Figure 3). Pour l'ensemble des sites, ces AC se répartissent équitablement entre années positives et négatives (de 36% à 62% d'AC positives). Aucun paramètre stationnel ou dendrométrique ne permet d'expliquer significativement les différences du nombre total et de la répartition des AC entre les sites.

Dans une grande majorité des cas, les croissances extrêmes coïncident avec des années particulièrement sèches ou pluvieuses durant la période allant de mai à

juillet (Figure 4) ; on observe également un effet négatif des grands froids hivernaux (Figure 4). Les chênaies sessiliflores ont réagi massivement et négativement en 1921, 1976 et 1989, années connues pour leurs étés chauds et secs (températures estivales supérieures de 1 à 2,6°C à la moyenne 1914-1993, et précipitations estivales inférieures de 24% à 48%). Pour ces années, la réduction de la croissance a été en moyenne de -32%, -28% et -25%. Les peuplements ont aussi réagi négativement en 1933 et en 1956 (-27% et -24%), années connues respectivement pour une pullulation de chenilles processionnaires (Lebourgeois *et al.*, 2004) et un froid hivernal intense (température moyenne de février inférieure de 9°C par rapport à la moyenne 1914-1993). À l'inverse, les chênaies sessiliflores

| | Données stationnelles | | | | | | | | | Données dendrométriques | | | | | |
|-----------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|------------|-------------------------|----------|-----------------------|--------------------|------------------|-----------------|
| | Longitude | Latitude | Altitude (m) | T _{an} (°C) | T ₇ (°C) | P _{an} (mm) | P ₇ (mm) | pHA | RUM (mm) | Nb. arbres | Age | Largeur de cerne (mm) | Nb. AC positives | Nb. AC négatives | |
| A | 1°32' 05" W | 48°10' 37" N | 80 | 11,3 | 18,1 | 688 | 46 | 4,10 | 148 | 2 | 8 | 99 (7) | 2.05 (0.72) | 13 | 15 |
| B1 | 0°36' 47" E | 48°29' 06" N | 242 | 9,9 | 16,9 | 720 | 55 | 4,09 | 157 | 20 | 143 (41) | 1.49 (0.62) | 9 | 10 | |
| B2 | 0°28' 10" E | 48°31' 41" N | 250 | 10,6 | 17,8 | 673 | 50 | 4,09 | 15 | 2 | 18 | 124 (20) | 1.64 (0.66) | 9 | 17 |
| B3 | 0°40' 46" E | 48°31' 21" N | 220 | 10,2 | 17,3 | 689 | 53 | 4,50 | 76 | 30 | 85 (2) | 1.75 (0.62) | 10 | 14 | |
| C | 0°27' 19" E | 47°48' 46" N | 126 | 10,9 | 18,3 | 673 | 50 | 4,08 | 120 | 27 | 95 (13) | 2.13 (0.85) | 10 | 7 | |
| D | 0°25' 20" E | 47°14' 16" N | 96 | 11,3 | 18,8 | 673 | 48 | 4,07 | 77 | 15 | 107 (14) | 1.81 (0.64) | 6 | 10 | |
| G1 | 2°07' 28" E | 47°15' 14" N | 176 | 11,0 | 18,9 | 672 | 51 | 4,30 | 16 | 2 | 23 | 78 (8) | 2.35 (0.88) | 16 | 14 |
| G2 | 2°16' 12" E | 47°12' 27" N | 179 | 11,1 | 19,0 | 692 | 52 | 4,41 | 13 | 7 | 15 | 103 (18) | 2.06 (0.69) | 18 | 11 |
| H1 | 2°43' 27" E | 46°38' 11" N | 267 | 10,7 | 18,6 | 753 | 60 | 4,29 | 14 | 5 | 18 | 116 (29) | 1.47 (0.52) | 14 | 9 |
| H2 | 2°43' 35" E | 46°40' 01" N | 260 | 10,7 | 18,6 | 753 | 60 | 4,30 | 11 | 1 | 30 | 111 (6) | 1.68 (0.61) | 13 | 12 |
| H3 | 2°45' 32" E | 46°40' 14" N | 254 | 10,7 | 18,6 | 753 | 60 | 5,12 | 13 | 5 | 14 | 137 (40) | 1.75 (0.6) | 11 | 7 |
| J | 3°06' 41" E | 46°30' 38" N | 282 | 10,2 | 18,2 | 761 | 65 | 4,27 | 14 | 3 | 15 | 134 (35) | 1.79 (0.63) | 10 | 10 |
| K | 2°43' 43" E | 48°27' 10" N | 80 | 11,0 | 18,7 | 612 | 55 | 4,60 | 148 | 2 | 9 | 108 (4) | 1.85 (0.79) | 16 | 14 |
| O | 5°14' 18" E | 46°10' 14" N | 260 | 10,7 | 19,9 | 875 | 68 | 4,90 | 171 | 30 | 85 (8) | 1.91 (0.66) | 13 | 16 | |
| Groupe 1 | | | 198 | 10,7 | 18,4 | 713 | 55 | 4,37 | 134 | | | 111 (19) | 1.87 (0.69) | 12 (3.3) | 12 (3.2) |
| L | 4°57' 36" E | 49°01' 58" N | 180 | 10,1 | 18,2 | 818 | 67 | 4,10 | 57 | 2 | 6 | 137 (22) | 1.6 (0.68) | 13 | 17 |
| N | 5°04' 27" E | 47°04' 56" N | 220 | 10,4 | 19,3 | 794 | 60 | 4,90 | 169 | 30 | 84 (5) | 2.27 (0.95) | 12 | 13 | |
| P | 6°02' 22" E | 48°01' 33" N | 330 | 9,8 | 18,3 | 890 | 73 | 4,90 | 156 | 3 | 0 | 127 (19) | 1.48 (0.6) | 14 | 19 |
| Q1 | 6°13' 39" E | 48°40' 24" N | 286 | 9,5 | 17,9 | 832 | 70 | 5,02 | 160 | 18 | 104 (13) | 2.05 (0.8) | 13 | 18 | |
| Q2 | 6°18' 18" E | 48°44' 31" N | 266 | 9,6 | 18,0 | 798 | 68 | 4,67 | 145 | 19 | 103 (18) | 2.15 (0.92) | 15 | 20 | |
| Q3 | 6°29' 39" E | 48°52' 18" N | 315 | 9,6 | 18,0 | 775 | 68 | 4,60 | 155 | 30 | 83 (3) | 2.18 (0.8) | 14 | 15 | |
| Q4 | 6°40' 30" E | 48°49' 58" N | 275 | 9,6 | 18,0 | 761 | 69 | 4,75 | 151 | 15 | 80 (8) | 2.5 (1.09) | 16 | 16 | |
| R1 | 7°27' 40" E | 49°00' 56" N | 320 | 9,2 | 17,8 | 744 | 71 | 4,30 | 151 | 29 | 127 (6) | 1.33 (0.44) | 14 | 17 | |
| R2 | 7°27' 55" E | 48°57' 19" N | 333 | 9,3 | 17,8 | 733 | 71 | 4,17 | 129 | 24 | 129 (31) | 1.6 (0.63) | 15 | 14 | |
| R3 | 7°30' 67" E | 48°56' 34" N | 318 | 9,6 | 18,3 | 700 | 70 | 4,43 | 161 | 29 | 107 (24) | 2.06 (0.81) | 10 | 10 | |
| R4 | 7°30' 50" E | 48°59' 28" N | 346 | 9,6 | 18,3 | 700 | 70 | 4,34 | 56 | 1 | 7 | 118 (25) | 1.51 (0.76) | 21 | 19 |
| R5 | 7°43' 43" E | 48°59' 22" N | 350 | 9,8 | 18,6 | 706 | 70 | 4,60 | 164 | 24 | 76 (3) | 1.99 (0.8) | 10 | 12 | |
| Groupe 2 | | | 295 | 9,7 | 18,2 | 771 | 69 | 4,6 | 138 | | | 108 (17) | 1.91 (0.79) | 14 (2.9) | 16 (3.1) |
| E | 0°29' 40" E | 46°37' 36" N | 116 | 11,3 | 19,0 | 753 | 50 | 4,10 | 97 | 2 | 8 | 81 (4) | 1.89 (0.81) | 13 | 15 |
| M | 4°27' 34" E | 48°17' 50" N | 160 | 10,5 | 18,8 | 699 | 56 | 4,40 | 161 | 24 | 84 (6) | 2 (0.82) | 17 | 22 | |
| Groupe 3 | | | 138 | 10,9 | 18,9 | 726 | 53 | 4,25 | 129 | | | 83 (5) | 1.95 (0.82) | 15 (2.0) | 19 (3.5) |
| F1 | 1°15' 33" E | 47°34' 07" N | 127 | 11,0 | 18,7 | 646 | 49 | 4,30 | 16 | 5 | 30 | 90 (7) | 2.05 (0.77) | 19 | 16 |
| F2 | 1°26' 38" E | 47°33' 43" N | 102 | 11,0 | 18,7 | 642 | 49 | 5,10 | 10 | 1 | 18 | 117 (32) | 2.02 (0.83) | 20 | 20 |
| F3 | 1°22' 34" E | 47°34' 50" N | 117 | 11,0 | 18,7 | 642 | 49 | 4,23 | 14 | 5 | 17 | 115 (23) | 1.63 (0.6) | 14 | 14 |
| Groupe 4 | | | 115 | 11,0 | 18,7 | 643 | 49 | 4,54 | 137 | | | 107 (21) | 1.90 (0.73) | 18 (3.2) | 17 (3.1) |

Figure 3 - Caractéristiques moyennes des sites. Les écart-types sont présentés entre parenthèses. Les peuplements sont regroupés selon la CAH. Les données en gras correspondent aux caractéristiques moyennes par groupe. T_{an} et P_{an} : température moyenne et précipitations annuelles moyennes calculées entre 1914 et 1993 ; T₇ et P₇ : température et précipitations de juillet moyennes calculées entre 1914 et 1993 ; pHA : pH de l'horizon organo-minéral A ; RUM : réserve utile maximale calculée sur les 100 premiers centimètres du profil pédologique.

ont répondu positivement aux années à étés frais et/ou humides, telles 1931, 1946, 1958 et 1982 au cours desquelles la croissance a été supérieure respectivement de 36%, 52%, 57% et 54% (Figure 4).

2 - Classification et regroupement des sites

L'ACP et la CAH ont permis de définir 4 groupes ayant des similitudes dans leur réponse aux extrêmes climatiques (Figure 3, Figure 5). On distingue 2 groupes « principaux » (groupe 1 avec 14 sites et groupe 2 avec 12 sites) et 2 groupes « secondaires » (groupe 3 avec 2 sites et groupe 4 avec 3 sites) (Figure 6). Le groupe 1 rassemble les sites de l'ouest de la zone d'étude, et le groupe 2 les sites de l'est (Figure 3, Figure 1). Le groupe 4 rassemble 3 sites d'un même massif forestier de l'ouest de la zone d'étude (sites F) ; les AC sont très proches de celles du groupe 1 sauf entre 1949 et 1953 où les placettes du groupe 4 présentent 5 AC consécutives (1949 et 1952 en négatif ; 1950, 1951 et 1953 en positif). Enfin, le groupe 3 rassemble les sites E et

M, éloignés géographiquement mais présentant des AC communes : 1917 (-), 1929 (+), 1940 (+), 1948 (+) et 1984 (+).

L'ACP montre que le premier facteur de structuration de la variabilité de la réponse aux extrêmes climatiques est le gradient de continentalité, avec un coefficient de corrélation (r) de 0,601 entre les coordonnées factorielles de l'axe 1 et la longitude (p<0,00001). Ce gradient se traduit par des différences mésoclimatiques entre l'ouest (océanique) et l'est (semi-continentale) qui engendrent des AC spécifiques à chaque groupe et pour des années à contrainte commune, des différences d'ERM entre les groupes. Ce gradient s'exprime principalement au travers de l'indice de De Martonne estival (mai à juillet), i.e. de l'intensité moyenne de la sécheresse sur la période 1914-1993, supérieure de 20 à 25% dans la moitié ouest de la France. Le second axe de l'ACP traduit un effet de la fertilité minérale du sol, au travers du pHA, avec une corrélation de 0,269 entre les coordonnées factorielles de l'axe 2 et pHA (p<0,001). L'analyse des ERM n'a cependant pas révélé de différences significatives entre les sites à pHA faibles (<4,5) et à pHA élevés (>4,5).

| Année | Années caractéristiques | | | | Anomalies climatiques estivales (mai à juillet) | | | |
|---------------|-------------------------|------------|------------|------------|---|--------------|--------------------|--------------|
| | Groupe 1 | | Groupe 2 | | Groupe 1 | | Groupe 2 | |
| | ERM | % | ERM | % | Tm (°C) | P (mm) | Tm (°C) | P (mm) |
| 1915 | | | -25 | 67 | | | 1,23 | -40,7 |
| 1916 | | | 51 | 75 | | | -0,78 | 12,6 |
| 1919 | | | -20 | 50 | | | -0,71 | -52,1 |
| 1921 | -32 | 43 | -31 | 42 | 1,11 | -47,1 | 1,82 | -75,1 |
| 1922 | | | 55 | 50 | | | 0,70 | -21,8 |
| 1926 | -32 | 36 | | | -1,56 | 7,1 | | |
| 1928 | | | -24 | 58 | | | -0,10 | -75,3 |
| 1931 | 45 | 43 | 30 | 33 | -0,08 | 25,5 | 0,72 | 49,7 |
| 1933 | -30 | 64 | -22 | 75 | -0,04 | -50,9 | -0,44 | 31,0 |
| 1934 | -26 | 43 | | | 0,99 | -55,7 | | |
| 1936 | 75 | 50 | | | -0,50 | 93,0 | | |
| 1941 | -25 | 43 | | | A1 = -3.16 | / | | |
| 1943 | | | 48 | 83 | | | A2 = 1.94 | / |
| 1946 | 41 | 57 | 61 | 100 | -0,21 | -4,1 | 0,71 | 33,8 |
| 1947 | | | -28 | 67 | | | 2,66 | -60,1 |
| 1951 | | | 27 | 33 | | | -0,53 | 53,5 |
| 1952 | | | -25 | 33 | | | 1,37 | -91,1 |
| 1954 | -27 | 57 | | | -0,59 | -50,5 | | |
| 1955 | | | 46 | 58 | | | -0,52 | 49,0 |
| 1956 | -24 | 50 | -24 | 42 | A2 = -8.35 | / | A2 = -10.37 | / |
| 1958 | 55 | 57 | 58 | 83 | 0,22 | 95,6 | 0,07 | 32,8 |
| 1961 | | | 35 | 42 | | | -1,22 | -1,0 |
| 1962 | | | -23 | 58 | | | -1,51 | -64,6 |
| 1964 | | | -22 | 58 | | | 1,33 | -111,6 |
| 1965 | | | 39 | 42 | | | -1,21 | 40,0 |
| 1966 | | | -27 | 33 | | | -0,41 | 2,0 |
| 1968 | | | 48 | 42 | | | -1,15 | 17,5 |
| 1969 | | | 47 | 75 | | | -0,07 | 0,1 |
| 1972 | -23 | 43 | | | -1,31 | -14,6 | | |
| 1976 | -26 | 71 | -28 | 83 | 2,63 | -93,7 | 2,27 | -89,1 |
| 1977 | | | 45 | 33 | | | -0,79 | 43,8 |
| 1978 | 46 | 43 | | | -0,95 | 9,1 | | |
| 1982 | 60 | 43 | 51 | 83 | 1,33 | 13,8 | 0,86 | 58,4 |
| 1983 | | | -25 | 33 | | | 1,03 | -38 |
| 1989 | -25 | 57 | | | 2,07 | -72,8 | | |
| 1993 | 35 | 36 | | | 0,41 | 23,6 | | |
| Nb AC+ | 7 | 14 | | | | | | |
| ERM+ | 51 | 46 | | | | | | |
| % | 47 | 60 | | | | | | |
| Nb AC- | 10 | 13 | | | | | | |
| ERM- | -27 | -25 | | | | | | |
| % | 51 | 46 | | | | | | |

3 - Évolution temporelle de la fréquence des années caractéristiques

Cette analyse se limite aux groupes 1 et 2 qui représentent plus de 80% des sites. La fréquence des AC entre 1914 et 1993 est plus élevée pour le groupe 2 (0,3 contre 0,24 dans le groupe 1 ; Figure 3). La fréquence plus faible à l'ouest de la France peut s'expliquer par un climat océanique plus tamponné que le climat semi-

Figure 4 - Années caractéristiques et anomalies climatiques observées sur la période 1914-1993 pour les groupes 1 et 2. Une année est considérée comme caractéristique à l'échelle du groupe quand au moins 33% des peuplements présentent cette année caractéristique. Les anomalies climatiques sont définies comme la différence entre la valeur de l'année et la moyenne calculée sur la période 1914 - 1993. Ces anomalies sont calculées pour la période estivale (mai à juillet) sauf pour les années à hiver froid (A1 : anomalie thermique de janvier ; A2 : anomalie thermique de février). Les données en gras (fond jaune) indiquent les années où les 2 groupes ont réagi ; les données en italique indiquent les années à hiver froid (année sur fond vert). ERM : écart relatif moyen (%) ; AC : année caractéristique ; «+» : année à croissance plus forte ; «-» : année à croissance plus faible.

continental. Par exemple, l'écart-type de l'indice de De Martonne estival entre 1914 et 1993 est de 2,39 pour le groupe 1 contre 2,86 pour le groupe 2. Cela traduit des contraintes climatiques plus homogènes à l'ouest et limite les changements abrupts de largeur de cerne.

L'évolution temporelle de la fréquence des AC diffère entre les 2 groupes. La fréquence du groupe 1 a été plus stable au cours des 80 années, variant de 0,15 à 0,25, excepté pour la décennie 1964-1973, avec une valeur de 0,1 (Figure 4). La fréquence est fortement corrélée avec la variabilité inter-annuelle de l'indice de De Martonne estival (Figure 6 : $r = 0,603$, $p < 0,0001$). Cela montre que la croissance de chêne sessile dans l'ouest de la France est fortement liée à la variabilité inter-annuelle de la contrainte hydrique estivale. Pour le groupe 2, la fréquence des AC varie de 0,15 à 0,35, avec une baisse à partir de 1984 (fréquence divisée par 3 ; Figure 6). Le déterminisme climatique de cette évolution est moins net que pour le groupe 1. On observe une corrélation entre la fréquence des AC et l'écart-type de la température moyenne annuelle ($r = 0,294$, $p < 0,001$) et celui de l'indice de De Martonne estival ($r = 0,12$, $p = 0,045$).

CONCLUSION

Deux grandes régions se distinguent dans la moitié nord de la France, avec une limite longitudinale à hauteur de Troyes. Cette limite dendroclimatique a déjà été mise en évidence en dendroarchéologie. Lambert (1996) distingue clairement deux ensembles de chronologies régionales de référence dans la moitié nord de la France.

Les principaux facteurs climatiques explicatifs des AC chez le chêne sessile sont le niveau de stress hydrique estival et les froids hivernaux. Ces observations sont en accord avec les travaux menés sur les chênes sessile et pédonculé en Europe (Lévy *et al.*, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 ; Lebourgeois *et al.*, 2004, Friedrichs *et al.*,

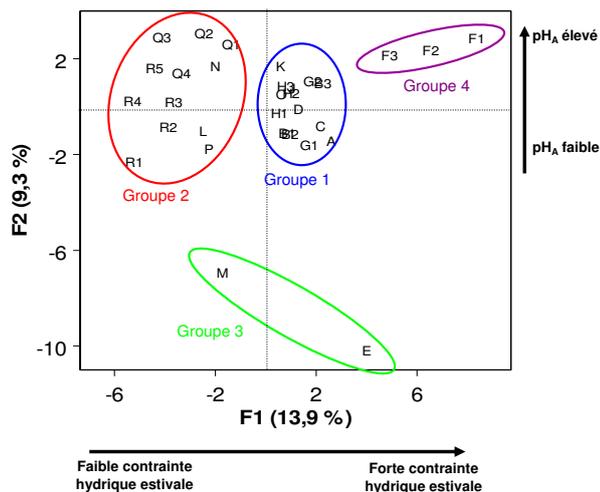


Figure 5 - Projection des 31 sites sur le plan défini par les deux premiers axes de l'ACP. Les sites ont été regroupés selon les résultats de la CAH réalisée sur les coordonnées factorielles des axes 1 et 2.

2009 ; Helama *et al.*, 2009), et se retrouvent également pour d'autres essences forestières (Dittmar *et al.*, 2003 ; Macias *et al.*, 2006 ; Lebourgeois, 2007 ; Bouriaud et Popa, 2009). Notons que la contrainte hydrique estivale joue un rôle plus fort dans l'ouest (sous climat océanique) que dans l'est (sous climat semi-continentale) où l'intensité moyenne de la sécheresse estivale est 20 à 25% inférieure. En revanche, nous n'observons aucun effet significatif des conditions locales de xéricité (appréhendée au travers de la RUM) sur l'intensité de la réduction de la croissance lors des sécheresses estivales, contrairement à ce qui a déjà été montré (Lévy *et al.*, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 ; Bréda et Pieffer, 1999). Cela peut s'expliquer par le fait que 80% des sites se situent en conditions de croissance peu limitantes, avec le plus souvent une RUM supérieure à 120 mm, seuil au-dessus duquel la sensibilité de la croissance radiale à la sécheresse estivale diminue fortement (Mérian, 2008). Enfin, dans une moindre mesure, le chêne sessile apparaît sensible aux températures de janvier et février, ce qui est cohérent avec les études sur la sensibilité des espèces à l'embolie hivernale (Cochard *et al.*, 1992 ; Cochard *et al.*, 2001).

La structuration des sites des groupes 1 et 2 selon le pH est à nuancer. La difficulté à comprendre l'effet du pH sur la sensibilité aux événements extrêmes peut venir de la corrélation entre pH_A et longitude ($R^2 = 0,179$; $p < 0,001$). Ainsi, l'effet pH_A pourrait contenir un effet « gradient de continentalité ». Aucune étude dendrochronologique sur le chêne sessile en Europe n'a mis en évidence un effet du pH sur la sensibilité au climat.

Dans notre étude, les conditions climatiques de l'automne précédent ne semblent pas jouer de rôle sur

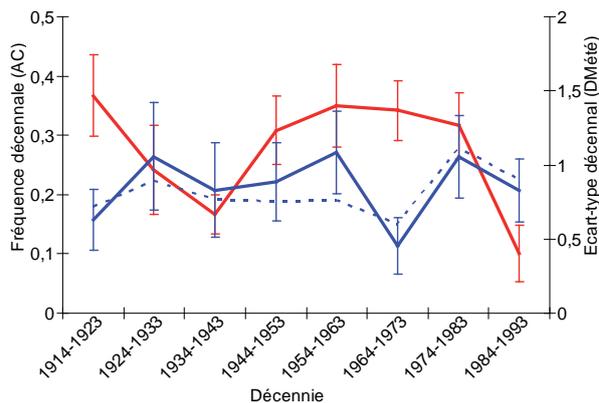


Figure 6 - Evolution de la fréquence décennale moyenne des années caractéristiques pour les groupes 1 (trait bleu) et 2 (trait rouge) entre 1914 et 1993 et de l'écart-type décennal de l'indice de De Martonne estival pour le groupe 1 (pointillés bleus). L'écart-type de l'indice de De Martonne estival (DMété) traduit la variabilité inter-annuelle des contraintes hydriques et thermiques estivales sur une décennie.

l'occurrence des années caractéristiques. Les travaux sur la réponse des chênes au climat moyen mettent pourtant en avant l'importance des conditions de septembre et d'octobre sur la mise en réserve d'hydrates de carbone, remobilisés au printemps de l'année suivante (Bréda et Granier, 1996 ; Barbaroux et Bréda, 2002). Cela laisse penser que les réserves carbonées ne participent qu'à la mise en place d'un faible pourcentage du cerne total (Santini *et al.*, 1994 ; Nola, 1996), la majeure partie étant liée aux conditions climatiques de la saison de végétation.

Dans notre zone d'étude, la fréquence des AC dépend plus de la variabilité inter-annuelle de la contrainte que du niveau moyen de la contrainte. A nouveau, cela peut s'expliquer par l'échantillonnage de contextes stationnels favorables, qui n'imposent pas de contrainte permanente de croissance. Cependant, les sites du groupe 4, situés au cœur de la zone couverte par les sites du groupe 1, présentent une fréquence d'AC plus forte que celle du groupe 1 (Figure 3). L'écart-type de l'indice de De Martonne estival n'étant pas significativement différent entre les 2 groupes (test de comparaison de moyenne : $t = 0,651$), la plus forte sensibilité au climat du groupe 4 pourrait être due à un niveau moyen de contrainte hydrique estivale plus élevé, l'indice de De Martonne estival étant inférieur en moyenne de 15% pour le groupe 4 sur la période 1914-1993.

Au final, le bilan hydrique estival apparaît comme la principale contrainte de croissance du chêne sessile, les années de très faible croissance correspondant aux années les plus sèches et les plus chaudes. Sur la gamme de conditions écologiques couvertes par l'échantillon, la fréquence des AC dépend principalement de la variabilité inter-annuelle du climat, sauf dans les conditions les plus contraignantes (groupe 4).

Pour les 70 prochaines années, les modèles climatiques prévoient, en France et en période estivale, une hausse des températures de 2 à 4 °C couplée à une diminution de 35 à 45% des précipitations (Déqué, 2007 ; Giorgi *et al.*, 2004). Cela pourrait se traduire, en plus d'une diminution plus forte de la croissance pour une AC donnée, par une hausse du nombre d'AC. La comparaison des groupes 1 et 4 montre qu'une diminution d'un point de l'indice de De Martonne estival conduit à une augmentation de la fréquence

décennale des AC de 0,1 point. Selon les modèles climatiques, la fréquence décennale des AC dans l'ouest de la France pourrait ainsi passer de 0,25 à 0,4 d'ici à la fin du XXI^e siècle. Cette analyse des années caractéristiques sur le chêne sessile dans la moitié nord de la France gagnerait à être complétée par une analyse des relations « cerne - climat moyen », qui permettrait de mettre en évidence d'éventuelles évolutions de la réponse de la croissance au climat au cours du XX^e siècle.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBAROUX C., BRÉDA N., 2002. Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22/17, 1201-1210.
- BECKER M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1110-1117.
- BECKER M., NIEMINEN T.M., GEREMIA F., 1994. Short-Term Variations and Long-Term Changes in Oak Productivity in Northeastern France - the Role of Climate and Atmospheric CO₂. *Annals of Forest Science*, 51/5, 477-492.
- BERGÈS L., CHEVALIER R., DUMAS Y., FRANC A., GILBERT J.-M., 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science*, 62/5, 391-402.
- BONTEMPS J.-D., 2006. Évolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XX^e siècle. Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy (France), 357 p.
- BOURIAUD O., POPA I., 2009. Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees-Structure and Function*, 23/1, 95-106.
- BRÉDA N., BADEAU V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, 340/9-10, 651-662.
- BRÉDA N., GRANIER A., 1996. Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annals of Forest Science*, 53/2-3, 521-536.
- BRÉDA N., PIEFFER M., 1999. Bilan hydrique et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport Scientifique Final, Inter-Région, Dépérissement forestier en vallée du Rhin, 60 p.
- BRÉDA N., 1998. Dépérissement forestier en vallée du Rhin. Analyse rétrospective de la croissance radiale des chênes de la forêt domaniale de La Harth. INRA Centre de Recherches Forestières Unité d'Ecophysiologie Champenoux (France), Nancy, 50 p.
- BRUAND A., PEREZ FERNANDEZ P., DUVAL O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19/3, 232-242.
- COCHARD H., BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 1992. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd., *Q. robur* L). *Annals of Forest Science*, 49/3, 225-233.
- COCHARD H., LEMOINE D., AMÉGLIO T., GRANIER A., 2001. Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. *Tree Physiology*, 21/1, 27-33.
- DÉQUÉ M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57/1-2, 16-26.
- DITTMAR C., ZECH W., ELLING W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173/1-3, 63-78.
- FRIEDRICH D.A., NEUWIRTH B., WINIGER M., LOFFLER J., 2009. Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. *Dendrochronologia*, 27/1, 21-30.
- FRITTS H.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London, New York, San Francisco, 567 p.
- GIORGI F., BI X.Q., PAL J., 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071-2100). *Climate Dynamics*, 23/7-8, 839-858.
- GUIOT J., 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 39-41.
- HELAMA S., LAANELAID A., RAISIO J., TUOMENVIRTA H., 2009. Oak decline in Helsinki portrayed by tree-rings, climate and soil data. *Plant and Soil*, 319/1-2, 163-174.
- IFN (INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL), 2007. La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 et 2006. Inventaire Forestier National, Nogent-sur-Vernisson, 143 p.
- LAMBERT G., 1996. Recherche de signaux anthropiques dans les séries dendrochronologiques du Moyen Âge. Exemple de séquences de Charavines-Colletière. Actes du V^e Congrès International d'Archéologie Médiévale Grenoble, 6-9 Octobre 1993, 143-152.
- LEBOURGEOIS F., PIEDALLU C., 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française* (Nancy), 57/4, 331-356.
- LEBOURGEOIS F., 1997. RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. 307 p.

- LEBOURGEOIS F., 2007. Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Annals of Forest Science*, 64/3, 333-343.
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G. DUCOS Y., 2004. Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Berce ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of Forest Science*, 61/4, 361-372.
- LEUZINGER S., ZOTZ G., ASSHOFF R. KORNER C., 2005. Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiology*, 25/6, 641-650.
- LÉVY G., BECKER M. DUHAMEL D., 1992. A Comparison of the Ecology of Pedunculate and Sessile Oaks - Radial Growth in the Center and Northwest of France. *Forest Ecology and Management*, 55/1-4, 51-63.
- MACIAS M., ANDREU L., BOSCH O., CAMARERO J.J., GUTIERREZ E., 2006. Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change*, 79/3-4, 289-313.
- MÉRIAN P., 2008. Dendroécologie du chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) dans la moitié nord de la France, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy (France), 39 p.
- MITCHELL T.D., CARTER T.R., JONES P.D., HULME M. NEW M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe : the observed record (1901-2000) and 13 scenarios (2001-2100). *Tyndall Centre Working Paper*, 55, 1-25.
- NOLA P., 1996. Climatic signal in earlywood and latewood of deciduous oaks from northern Italy. In : J.S. Dean, D.M. Meko and T.W. Swetman (Editors), *Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon*. The University of Arizona, Department of Geosciences, Tucson, 249-258.
- PICHLER P. OBERHUBER W., 2007. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 242/2-3, 688-699.
- PLANTON S., DÉQUÉ M., CHAUVIN F. TERRAY L., 2008. Expected impacts of climate change on extreme climate events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340/9-10, 564-574.
- SANTINI A., BOTTACCI A. GELLINI R., 1994. Preliminary dendroecological survey on pedunculate oak (*Quercus robur* L) stands in Tuscany (Italy). *Annals of Forest Science*, 51/1, 1-10.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1990. Tree rings and environment. Dendroecology. Haupt, Berne, Stuttgart, Vienna, 609 p.
- TESSIER L., NOLA P., SERRE-BACHET F., 1994. Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytologist*, 126/2, 355-367.

ARBORETUM ET DENDROÉCOLOGIE

DÉPÉRISSEMENT DU CÈDRE

ARORETUMS AND DENDROECOLOGY

CEDARS' DECAY

LAURA NIEDERLENDER, VINCENT BADEAU

INRA Nancy - UMR Ecologie Ecophysiologie Forestières, F 54280 Champenoux.

Contact : lniederlender@hotmail.fr

RÉSUMÉ

*L'analyse dendroécologique des cèdres (*Cedrus atlantica*, *Cedrus libani*, *Cedrus deodara*) présents sur le Domaine des Barres et à l'Arboretum d'Amance a permis de retracer l'évolution de la croissance radiale des arbres en fonction du climat et de mettre en évidence les mécanismes d'un dépérissement dont les premiers signes visibles ont été observés en 2007. L'étude fait ressortir le rôle prépondérant de la sécheresse exceptionnelle de 2003, qui semble être le facteur déclenchant du processus de dépérissement des arbres. Il a pu être constaté qu'une fois affaiblis, les arbres ont été soumis à un fort stress biotique avec une attaque de scolytes de sapin (*Pityokteines spiniden*) ; de nombreuses piqûres ayant été recensées sur les arbres étudiés.*

MOTS-CLÉS : CÈDRES, DÉPÉRISSEMENT, DENDROÉCOLOGIE , SECHERESSE.

ABSTRACT

*The dendroecological analysis of cedars (*Cedrus atlantica*, *Cedrus libani*, *Cedrus deodara*) standing in the Domain of Barres and in the Arboretum of Amance made it possible to redraw the radial growth evolution of trees according to the climate and to understand the mechanisms of decay. The first visible signs of decay were noticed in 2007. The study highlights the major role of the exceptional drought in 2003, which seems to be the triggering factor of the decay process. We also noticed that once weakened, trees had to face a strong biotic stress with an attack of fir's scolytes (*Pityokteines spiniden*), since numerous bites were listed on the studied trees.*

KEYWORDS: CEDARS, DECAY, DENDROECOLOGY, DROUGHT.

INTRODUCTION

Depuis 2007, un fort dépérissement des cèdres (*Cedrus atlantica* Manetti, *Cedrus deodara* Loudon, *Cedrus libani* Loudon) été observé dans l'Arboretum d'Amance (48°29'26.31"N ; 6°09'18.61"E) et le Domaine National des Barres (47°50'41.38"N ; 2°45'32.38"E) (Figure 1) - deux sites importants par ailleurs pour l'expérimentation en écologie forestière - conduisant à l'abattage total des collections.

Le dépérissement est un phénomène complexe où plusieurs facteurs contribuent à l'affaiblissement et éventuellement à la mort de l'arbre. Il est possible de catégoriser ces facteurs selon qu'ils soient prédisposants, déclenchants ou aggravants. Les facteurs prédisposants influencent la vigueur initiale de l'arbre ou du peuplement, à l'instar du climat moyen, des propriétés physico-chimiques du sol, de la qualité du drainage et même des compétitions inter et intra-spécifiques. En revanche, les facteurs déclenchants sont souvent des événements climatiques extrêmes (sécheresse, tempête...) ou des attaques parasitaires.

L'analyse *in situ* des peuplements de l'Arboretum des Barres avec le Département Santé des Forêts (DSF) a permis de mettre en avant le rôle des scolytes du sapin (*Pityokteines spinidens*) dans le processus de dépérissement (Figure 2). Toutefois, les gestionnaires respectifs de ces arboretums, à savoir le Cemagref pour le domaine des Barres et l'INRA-Nancy pour l'Arboretum d'Amance, ont souhaité mettre en place une analyse dendrocécologique afin de déterminer et de hiérarchiser l'ensemble des causes impliquées dans le phénomène, en se basant sur l'hypothèse que l'attaque de scolytes n'est pas la cause principale du dépérissement mais un phénomène aggravant dans un processus déjà bien avancé. Les objectifs de la présente étude sont donc de :

- modéliser la croissance des arbres en fonction du climat (bilan hydrique) afin de mettre en relief les facteurs prédisposants au dépérissement et de les hiérarchiser ;
- dater le début du dépérissement pour chaque site, apprécié par une réduction de croissance.



Figure 1 - Parcelle dite « des Barrillons » (Domaine des Barres ; photo Cemagref - Nogent).

Figure 2 (en haut) - Attaque de scolytes (photo Cemagref - Nogent).

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Echantillonnage et mesure

Au total, 89 individus ont été échantillonnés, avec respectivement 31 et 58 individus pour le l'Arboretum d'Amance (Figure 3) et le Domaine des Barres (Figure 4). Pour chaque parcelle échantillonnée, l'âge des plantations était connu. À l'inverse, il a été impossible de retracer précisément les provenances pour l'ensemble des individus étudiés. Tous les arbres échantillonnés étaient dépérissants ou morts, faute de pouvoir

| Parcelle | Nombre d'individus prélevés | Espèce | Date de plantation | Provenance |
|----------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|---|
| 8b-11 | 2 | <i>Cedrus libani</i> | Semis naturel | Amance |
| 9-12 | 3 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1909 | Non connue |
| 9-13 | 6 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1933 - 1934 - 1938 | Trouhaude Ventoux Les Barres |
| 12-8 | 2 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1964 | Algérie, région de Tuggurt (1600 m, versant Nord) |
| 12-16 | 3 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1982 | Non connue |
| 13-9 | 10 | <i>Cedrus libani</i> | 1950 | Liban |
| 17-10 | 5 | <i>Cedrus deodara</i> | 1964 | Inde - Dwassaun |

Figure 4 - Echantillonnage à l'Arboretum d'Amance.

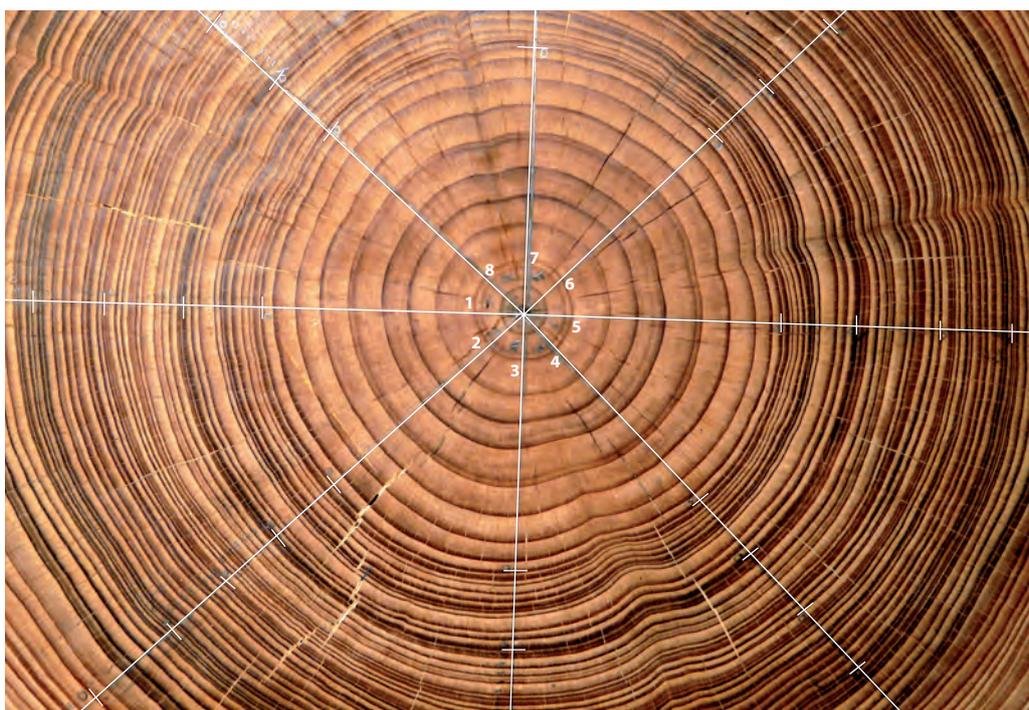


Figure 5 - Rondelle de cèdre ; traçage des axes, décompte et mesure des cernes (photo Niederlender L.). Les tracés, effectués au crayon sur le bois, ont ici été redessinés en blanc.

| Parcelle - lieu dit | Nombre d'individus prélevés | Espèce | Date de plantation | Provenance |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--|--------------------------|
| «Barrillons» parcelle VII | 17 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1926 1927 à 1931 : 40% de regarnis | Les Barres |
| «Barrillons» parcelle IX | 18 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1296 1926 à 1931 : 28% de regarnis | Les Barres |
| «Barrillons» alignement | 5 | <i>Cedrus deodara</i> | 1935 | Non connue |
| «Grande Métaireie» | 12 | <i>Cedrus atlantica</i> | 2 dates de plantation 1890 1953 | Non connue Les Barres |
| «Séquoia» | 4 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1885 | Non connue |
| «Sous le Château» | 2 | <i>Cedrus atlantica</i> | 1887 | Non connue |

Figure 3 - Echantillonnage au Domaine des Barres.

échantillonner des arbres sains. L'ensemble des cèdres issus du Domaine des Barres semblait être parasité par des scolytes du sapin, ayant auparavant attaqués les sapins de Vancouver (*Abies grandis*) du domaine. À l'Arboretum d'Amance, seuls quelques cèdres de l'Atlas présentaient des traces de piqûres de scolytes, observées pour la première fois au printemps 2009.

Sur chaque arbre abattu, une rondelle a été prélevée à 1,30 m. Seuls quelques cèdres encore sur pied à l'Arboretum d'Amance ont été carottés, soit 6 *C. atlantica* et 5 *C. deodara*. Pour chaque rondelle, nous avons mesuré les largeurs de cerne sur 8 rayons (Figure 5), puis calculé la moyenne quadratique pour obtenir une série moyenne par individu. Les mesures ont été réalisées à l'aide du logiciel CooRecorder®, à partir d'images scannées des différents rayons à une résolution de 2400 dpi.

2 - Interdatation et standardisation des séries dendrochronologiques

Les séries dendrochronologiques ont été interdatées en amont des mesures en pointant les années décennales sous loupe binoculaire en se basant sur les années de référence observées pour des espèces proches (pin sylvestre pour les barres, sapin de Vancouver et douglas pour l'Arboretum d'Amance). Une vérification *a posteriori* a également été réalisée mais n'a pas mis en évidence de cernes manquants ou de faux cernes.

Après avoir supprimé les plus jeunes cernes qui présentent des niveaux de croissance très élevés, les séries ont été standardisées à l'aide d'une fonction « exponentielle négative ». Contrairement à d'autres types de fonctions couramment utilisées telle que la fonction « sinusoidale élevé au cube » (cubic smoothing spline, Cook *et al.*, 1981), la fonction « exponentielle négative » permet de conserver le signal moyenne fréquence, *i.e.* les tendances pluriannuelles liées notamment aux dépérissements. La standardisation a été réalisée avec le package « dplR » développé par Bunn (2008).

3 - Données météorologiques et bilan hydrique

Pour l'Arboretum d'Amance, les données météorologiques journalières sont issues du poste météorologique INRA situé à proximité de l'arboretum. Elles couvrent la période 1950-2008. La pluviométrie annuelle est de 752 mm et la température moyenne de 10,7°C. Pour le site des barres, nous avons acquis les données journalières de la station Météo-France d'Orléans (n°45 055 001) pour la période 1950-2008. Le cumul des pluies annuelles est de 634 mm et la température moyenne annuelle d'environ 10,8°C.

Pour les deux sites, les bilans hydriques journaliers ont été calculés grâce à l'application Biljou (Granier *et al.*, 1999). Afin de pouvoir paramétrer le modèle, des fosses pédologiques ont été creusées sur les deux sites jusqu'à une profondeur de 2 m et les enracinements ont été décrits succinctement (Figure 6). Pour Amance, une profondeur de sol « utile » – profondeur au-delà de laquelle l'arbre n'a plus accès à la ressource en eau du fait de l'arrêt de l'enracinement – de 1,5 m a été utilisée dans le modèle (1,8 m pour les Barres). En l'absence de mesures de terrain, l'indice foliaire des peuplements a été fixé, après analyse bibliographique, à 6 m²/m².

Le modèle de bilan hydrique permet d'estimer le stress hydrique devant être supporté par les arbres. Il est quantifié par trois variables : les dates de début et de fin de stress, la valeur maximum du stress et l'intensité annuelle du stress (l'indice de stress hydrique). Le modèle ne pouvant pas reproduire les épisodes d'excès d'eau dans le sol, la quantité d'eau drainée a été utilisée comme indicatrice de l'intensité potentielle des épisodes d'ennoyages.



Figure 6 - Fosse pédologique (Arboretum d'Amance ; photo Niederlender L).

4 - Modélisation

Afin de déterminer si la croissance radiale des cèdres a effectivement « décroché » dans les dernières années suite à un processus de dépérissement, et de dater ce décrochement, la croissance radiale a été tout d'abord modélisée sur la période 1950-1999 puis le modèle a été appliqué sur la période 2000-2008 afin de comparer la croissance prédite par le modèle et la croissance observée.

Les modèles ont été calibrés en utilisant la régression sur les moindres carrés partiels (PLS pour « partial last square ») sous le logiciel R avec le package pls développé par Wehrens et Mevik (2007). Cette méthode, proposée par Wold *et al.* (1983), permet de comprendre, en l'absence de modèle théorique, les relations existant entre les variables explicatives X, et les variables dépendantes Y, d'un système complexe. La régression PLS peut être utilisée comme une méthode de description des relations existant entre deux groupes de variables X et Y. Elle est alors, en quelque sorte, une analyse en composantes principales (ACP) contrainte par le jeu des variables à expliquer (Torre et Evans, 2001). Cette méthode s'accommode très bien des contraintes imposées par le jeu de données qui présente de nombreuses variables, la plupart corrélées entre elles.

Les indices de croissance par espèce pour chaque site ont été modélisés en fonction de variables clima-

tiques ayant été synthétisées sur 4 périodes reflétant la phénologie des cèdres : l'hiver (d'octobre à mars), le printemps (début de la saison de végétation correspondant au mois d'avril et de mai), l'été (de juin à août, maximum de la période de végétation) et la fin de l'été (septembre). Ces variables correspondent aux données météorologiques de bases et aux indices calcu-

lés à partir du modèle de bilan hydrique.

La période 1950-2000 est relativement courte vis-à-vis de la méthode statistique utilisée. À ce titre, seules les espèces dont les séries standardisées couvraient au moins l'ensemble de cette période ont été modélisées : le cèdre de l'Atlas pour les deux sites d'étude et le cèdre de l'Himalaya pour le domaine de Barres.

II - RÉSULTATS

1 - Facteurs climatiques et croissance radiale

L'ensemble des modèles montre l'importance du bilan hydrique sur la croissance radiale. On remarque que les indices liés au stress hydrique estival, à savoir le nombre de jours de stress pour l'Arboretum d'Amance et l'intensité du déficit hydrique pour le Domaine des Barres, ont une corrélation négative avec la croissance radiale (Figure 7). On note également que l'indice d'excès d'eau correspondant aux eaux de drainage calculé avec le programme Biljou (§ I.2) a un impact positif sur la croissance des arbres. Cette observation implique que les sols ne présentaient pas de période d'engorgement néfaste à la croissance des arbres.

| | Modèle 1 : C. atlantica Amance (r2 =0.28) | Modèle 2 : C. atlantica Barres (r2 =0.35) | Modèle 3 : C. deodara Barres (r2 =0.44) |
|-------------|--|--|--|
| Paramètre 1 | Nombre de jour de stress été (-) | Déficit été (-) | Déficit été (-) |
| Paramètre 2 | Pluie hiver (+) | Nombre de jour de stress été (-) | Nombre de jour de stress été (-) |
| Paramètre 3 | Excès d'eau hiver (+) | Pluie printemps (+) | Pluie hiver (+) |
| Paramètre 4 | Déficit été (-) | Pluie hiver (+) | Pluie printemps (+) |
| Paramètre 5 | Nombre de jour de stress été (n-1) (+) | Excès d'eau hiver (+) | Pluie été (+) |

Figure 7 - Liste des paramètres dont les coefficients sont significatifs (pvalue < 0,01).

2 - Début du dépérissement

Pour l'ensemble des modèles, le décrochage observé entre les prédictions et les indices de croissance se fait en 2005 avec une diminution nette de

l'indice jusqu'à une valeur nulle pour les modèles 2 et 3, alors que les prédictions indiquent une reprise de croissance potentielle (Figure 8).

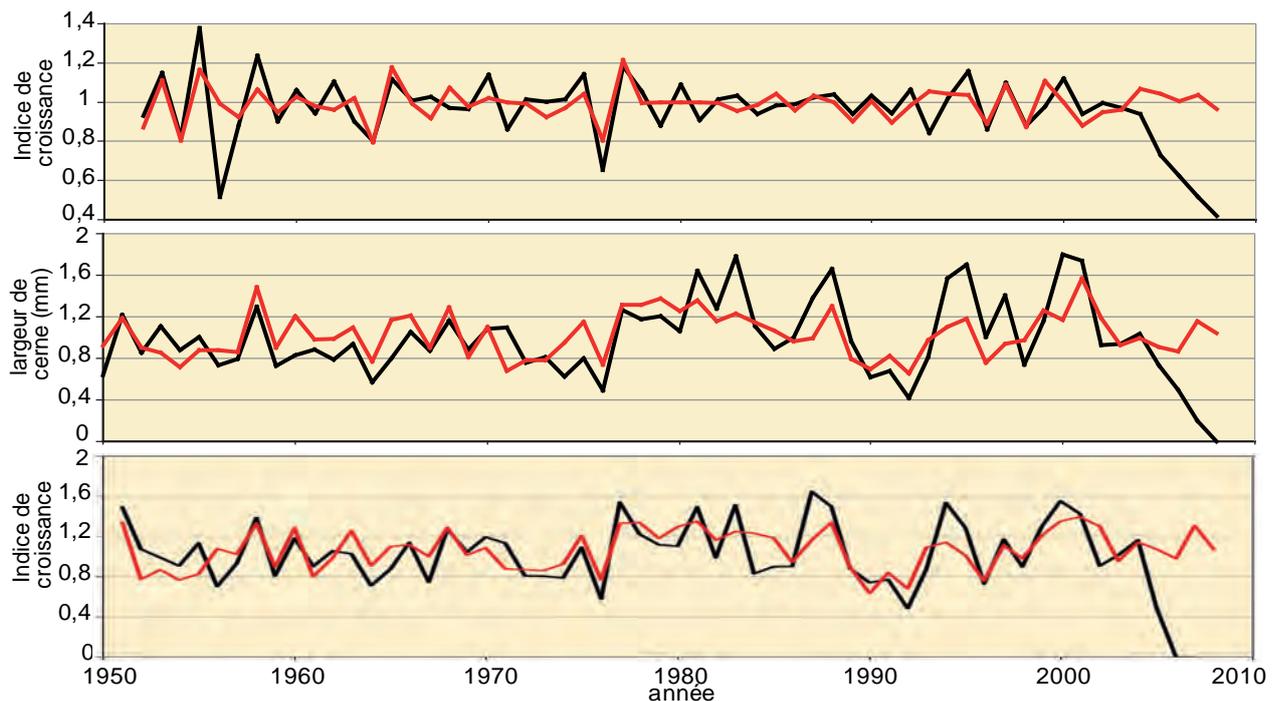


Figure 8 - Comparaison des prédictions des modèles face aux indices de croissance observés (rouge, indice ; noir, modèle).

III - DISCUSSION

Les résultats obtenus dans cette étude tendent à mettre en évidence que le dépérissement des cèdres à Amance et aux Barres a débuté en 2005, soit 2 ans avant que les premières attaques de scolytes soient recensées aux Barres. Dans ce cas précis, les scolytes auraient donc profité de la faiblesse des cèdres et auraient accentué les phénomènes de mortalité (facteur aggravant) ; ces insectes ne pouvant pas coloniser une tige en bon état physiologique (Nageleisen 2007).

Le ou les facteurs déclenchants le dépérissement sont plus délicats à mettre en évidence. L'année 2003 ayant été une année particulièrement sèche, à l'instar de l'année 1976, l'hypothèse d'un arrière effet de cette sécheresse sur la croissance radiale des arbres est envisageable. De tels résultats ont par ailleurs été obtenus sur le sapin (Becker et Lévy, 1987) ou les chênes (Becker et Lévy, 1982 ; Bréda et Peiffer, 1999). La sécheresse et la canicule de 2003 ont par ailleurs joué un rôle prépondérant dans les dépérissements observés dans les arboretums des Barres et d'Amance, avec des mortalités observées dès l'automne ou l'hiver 2003 (cas de *Abies grandis*), différées d'une année (plusieurs espèces d'épicéa) voire plus. Notons que dans des zones très contraignantes de la moitié sud de la France et jusqu'au peuplement de la Trouhaude (Dijon), les peuplements de cèdres ne semblent pas montrer de signes de dépérissement. Ces peuplements, soumis de façon récurrente à des contraintes hydriques fortes, pourraient être mieux adaptés que les peuplements des Barres et d'Amance qui n'avaient subi jusqu'à 2003 que des sécheresses relativement modérées.

Dans l'Arboretum d'Amance, et pour les trois espèces de cèdre (Figure 9), la chute de croissance très nette en 2003 est précédée par deux autres années de faible croissance : 2001 et dans une moindre mesure 2002. Aux Barres (Figure 10), la taille du cerne 2003 est du même ordre de grandeur que celle du cerne 2002, ce dernier étant beaucoup plus petit que le cerne 2001. Ces chutes de croissance antérieures à 2003 ne

peuvent être attribuées avec certitude à aucun facteur climatique. On constate cependant qu'en 2001 (les Barres), 1999 et 2000 (Amance), il n'y a pas eu de stress hydrique. Cette absence de stress, considérée comme un facteur favorable à la croissance par les modèles, correspond peut-être à des situations d'excès d'eau préjudiciables aux cèdres. Malheureusement cette hypothèse n'a pu être validée avec nos modèles. Toutefois, l'analyse des fosses pédologiques a montré que les arbres poussaient sur des sols profonds et lourds, constitués en grande majorité d'argile (§ I.3). Rippert (2007) souligne que ces types de sols peuvent être très favorables à la croissance des cèdres à condition qu'ils ne soient ni compacts ni asphyxiants.

De plus, les experts, présents lors de la tournée de terrain au Domaine des Barres, ont observé, dans les quatre fosses pédologiques creusées au pied de cèdres encore vivants, que les racines des arbres étaient mortes. Notre étude ne permet pas de conclure sur la chronologie des faits ; à savoir si la mort des racines est une suite logique aux dépérissements observés des houppiers, ou si au contraire le dépérissement a commencé par la mort des racines. Cependant l'analyse mycologique des systèmes racinaires n'a révélé ni armillaire (*Armillaria mellea*), ni fomes (*Fomes fomentarius*) et ni phytophthora (*Phytophthora capsici*) qui sont des champignons capables de faire pourrir les racines. Cette observation peut corroborer l'hypothèse d'une hypoxie racinaire.

Par ailleurs, d'après Froux (2005), le xylème semble plus vulnérable à la cavitation dans les racines que dans les branches et ce pour trois conifères méditerranéens (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* et *Pinus nigra*). La sève brute, transportée par le xylème, est tirée vers le haut par la force motrice qu'est la transpiration. Ce flux d'eau est continu et induit un gradient de potentiel hydrique décroissant du sol jusqu'à l'atmosphère via les différents organes de la plante (racines, tiges, rameaux et feuilles). Dans des conditions de stress hydrique intense, le xylème

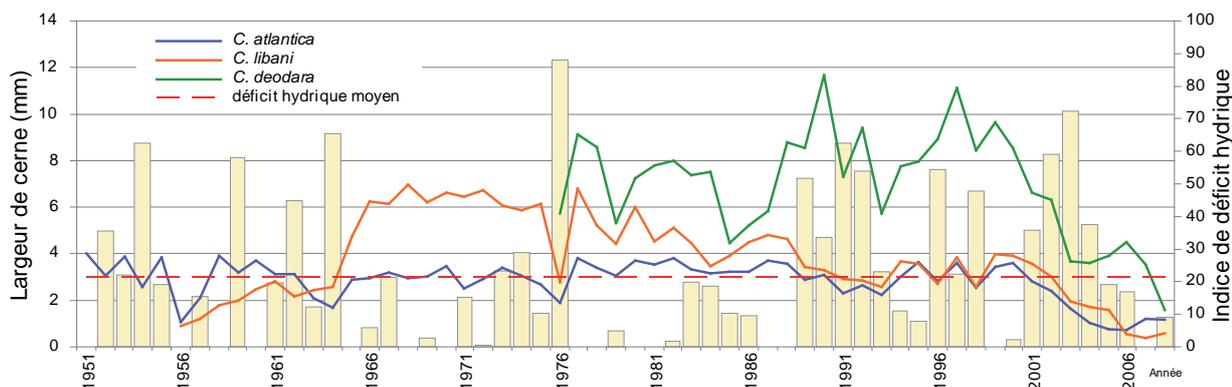


Figure 9 - Evolution des largeurs de cerne par espèces et déficit hydrique pour l'Arboretum d'Amance.

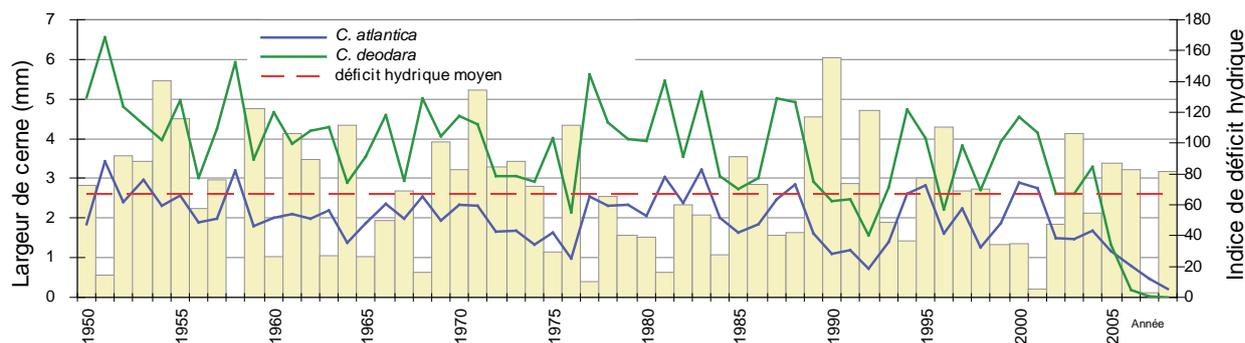


Figure 10 - Evolution des largeurs de cerne par espèces et déficit hydrique pour le Domaine des Barres.

peut être soumis à des potentiels hydriques très faibles, ce qui peut conduire à des dysfonctionnements et notamment à des embolies dues aux cavitations et à l'entrée d'air dans les tissus conducteurs. Ces phénomènes réduisent considérablement la conductivité du xylème. Les observations de Froux (2005) suggèrent que les racines ont sans doute subi en premier les conséquences de la sécheresse de 2003 à 2006.

La dernière hypothèse peut être celle de la sylviculture. À Amance comme aux Barres, aucune éclaircie n'a été réalisée depuis les plantations. Or, certains auteurs comme Aussenac et Finkelstein (1983), soulignent que l'enlèvement d'une partie de l'indice foliaire des peuplements, à l'aide des pratiques d'élagage, d'éclaircies, se traduit par des changements

microclimatiques qui affectent positivement le bilan hydrique du sol et le bilan énergétique au niveau du houppier. Ces améliorations ont une influence significative sur les échanges gazeux et, par conséquent, sur la vitesse et la période de croissance en hauteur et en circonférence. Nous observons par ailleurs que le port des arbres étudiés est différent de celui des arbres plantés dans le sud de la France dans des conditions très contraignantes vis-à-vis de la ressource en eau. Sur nos sites d'étude les fûts sont très élancés et très hauts, alors que dans les cédraies du sud de la France le port est plus « trapu ». Ces différences morphologiques jouent peut-être un rôle dans l'adaptation de l'arbre aux contraintes hydriques.

CONCLUSION

Le dépérissement et la mortalité des cèdres dans l'Arboretum et le Domaine des Barres avaient été attribués aux attaques de scolytes. Les fortes populations d'insectes qui s'étaient développées sur les sapins dépérissants suite à la sécheresse de 2003 se seraient reportées « accidentellement », et sur les collections de cèdres en l'absence d'autres essences à coloniser.

L'analyse dendrochronologique a permis de mettre en évidence que le dépérissement des cèdres s'est enclenché antérieurement aux premières observations de scolytes et de façon concomitante au dépérissement d'Amance où aucune attaque parasitaire n'a été observée. Les modèles dendroclimatiques calibrés sur les deux sites semblent indiquer que l'année 2005 a été une année charnière à partir de laquelle la santé des peuplements a basculé. Cet affaiblissement de la vigueur des arbres peut être expliqué par un arrière effet du très fort stress hydrique de l'année 2003. Il n'est cependant pas exclu que l'année 2003 soit un « coup de grâce » porté à des peuplements déjà affaiblis par un engorgement potentiel des sols en 2000-2001. Bien que cette hypothèse ne puisse pas être vérifiée, la destruction d'une partie des systèmes raci-

naires suite à des excès d'eau aurait démultiplié les effets de la sécheresse de 2003.

La réussite des cèdres hors de la zone méditerranéenne n'est donc pas une certitude acquise pour les gestionnaires forestiers, qui souhaitent faire face aux changements climatiques prévus pour ces prochaines décennies. Les dépérissements observés sur le Domaine des Barres et à l'Arboretum d'Amance viennent ternir l'image, largement véhiculée, d'essence de référence pour les années à venir. Notre étude montre que le cèdre en plantation relativement dense ne semble pas avoir résisté à la sécheresse de 2003, et ce quelque soit l'espèce (*C. atlantica*, *C. deodara* ou *C. libani*). Cela prouve que nous ne connaissons pas forcément très bien le comportement de ces essences hors contexte méditerranéen, ni leur conduite en peuplement.

Par ailleurs cette étude souligne l'intérêt des arboretums dans l'expérimentation et la recherche sylvicole. Ces collections parfois plantées dans des conditions proches des peuplements de production, comme c'est le cas au Domaine des Barres, sont une ressource non négligeable pour comprendre le fonctionnement et l'adaptation des essences exogènes.

Remerciements

Cet article est extrait d'une étude réalisée lors d'un stage de Master 2 de l'Université Henri Poincaré - Nancy I. Ce travail a bénéficié de l'appui scientifique de Nathalie Bréda, Yves Lefèvre, Jean-Luc Dupouey (UMR Ecologie & Ecophysiologie, INRA-Nancy) ; de l'appui technique de l'Unité Expérimentale Forestière de Lorraine (INRA-Nancy) et de l'Unité de Recherche «Ecosystèmes Forestiers» du CEMAGREF - Nogent sur Vernisson ; ainsi que de l'expertise de François-Xavier Saintonge (Département Santé des Forêts) et de Marie-Reine Fleisch (AgroParisTech).

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC G., FINKELSTEIN D., 1983. Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du Cèdre. *Ann. Sc. For.*, 40, 67-77.
- BECKER M., LÉVY G., 1982. Le dépérissement du chêne en forêt de Tronçais. Les causes écologiques. *Ann. Sc. For.*, 39(4), 439-444.
- BECKER M., LÉVY G., 1987. Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. *Ann. Sc. For.*, 44 (4), 403-416.
- BLACK T.A., 1979. Evapotranspiration from Douglas fir stands exposed to soil water deficit. *Water Resources Research*, 15, 164-170.
- BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique de 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. *Rev. For. Fr.*, LVI, 109-128.
- BRÉDA N., PEIFFER M., 1999. Etude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la harth (haut-rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. «Dépérissement forestier en vallée du Rhin», PROGRAMME INTERREG II, 60 p.
- BUNN A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 115-124.
- COOK E.R., PETERS K., 1981. The smoothing spline : a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring bulletin*, 41, 45-55.
- FROUX F., DUCREY M., DREWER E., HUC R., 2005. Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees*, 19, 137-144.
- GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P., VILLETTE S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.
- NAGELEISEN L.M., 2007. Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France. *Forêt entreprise*, n° spécial « Climat propice pour le cèdre » 174, 27-30.
- RIPPERT Ch., 2007. Autécologie du cèdre de l'Atlas. *Forêt entreprise*, n° spécial « Climat propice pour le cèdre », 174, 17-19.
- TORRE F., EVANS K., 2001. Multivariate calibration of sensory data with instrumental measurements: towards the analysis of apple flavour. Agro-industrie et méthodes statistiques, 16-18 janvier 2001, Lille, France.
- WOLD S., ALBANO C., DUNN III W.J., ESBENSEN K., HELLBERG S., 1983. Pattern Recognition : Finding and Using Regularities in Multivariate Data. *In Food Research and Data Analysis* (MARTENS J. éd.), Applied Science Publications, London.

DYNAMIQUE INTRA-ANNUELLE DE LA FORMATION DU BOIS DE TROIS ESPÈCES DE CONIFÈRES (EPICÉA COMMUN, PIN SYLVESTRE ET SAPIN PECTINÉ) DANS LES VOSGES

INTRA-ANNUAL DYNAMICS OF WOOD FORMATION FOR THREE CONIFER SPECIES
(NORWAY SPRUCE, SCOTS PINE AND SILVER FIR) IN NORTHEAST FRANCE

HENRI CUNY¹, CYRILLE RATHGEBER¹, MERIEM FOURNIER²

¹ INRA, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, F 54280 Champenoux.

² AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), ENGREF, 14 rue Girardet, F 54000 Nancy

Contact : henri.cuny@nancy.inra.fr

RÉSUMÉ

La dynamique intra-annuelle de la formation du bois a été suivie pour trois espèces de conifères (Epicéa commun, Pin sylvestre et Sapin pectiné) dans les Vosges du nord au cours de l'année 2008. Pour cela, des petits échantillons de bois ont été prélevés hebdomadairement sur le tronc de 5 arbres par espèce. A partir des échantillons collectés, des coupes anatomiques ont été réalisées. En microscopie optique, quatre zones cellulaires peuvent être distinguées sur les coupes : les zones (1) cambiale, (2) d'expansion, (3) d'épaississement et lignification et (4) des trachéides matures. Les comptages cellulaires dans chacune des zones pour chaque date de prélèvement ont permis l'élaboration du calendrier de la formation du bois pour les trois espèces. La phénologie foliaire a également été observée hebdomadairement. L'initiation de l'activité cambiale et de la xylogénèse s'est faite fin avril pour les pins et les sapins, début mai pour les épicéas. Pour les trois espèces, elle succédait de quelques jours à la reprise de l'activité des méristèmes apicaux, en accord avec la théorie d'une régulation hormonale de l'initiation de l'activité cambiale. La cessation des divisions cellulaires dans la zone cambiale s'est produite entre fin août et mi-septembre en fonction de l'espèce, alors que la fin de l'activité des méristèmes apicaux est survenue entre mi-juin et début juillet pour les trois espèces. La longue durée entre ces deux phénomènes suggère que la fin de l'activité cambiale n'est pas soumise à un contrôle hormonal par les méristèmes apicaux. En raison d'initiations plus tardives et de fins plus précoces, l'activité cambiale et les phases de la xylogénèse ont été plus courtes chez les épicéas. La poursuite des analyses le long d'un gradient altitudinal pour plusieurs années nous permettra de mieux comprendre l'influence des facteurs climatiques sur la formation du bois et sur le comportement des espèces étudiées.

MOTS-CLÉS : ACTIVITÉ CAMBIALE, XYLOGÉNÈSE, CONIFÈRES, CERNES DE CROISSANCE, TRACHÉIDES, PHÉNOLOGIE FOLIAIRE.

ABSTRACT

We investigated the intra-annual dynamics of wood formation for three conifer species (Norway spruce, Scots pine and silver fir) in the Vosges Mountains (northeast France) using weekly samples of wood, taken around the stem during 2008. Anatomical slices were prepared from the samples collected for observations with an optical microscope. Four different cellular zones can be distinguished on the anatomical slices: the (1) cambial zone, (2) expansion zone, (3) thickening and lignification zone and (4) mature tracheid zone. Cell counting in each zone and for each sampling date allowed us to develop a wood formation calendar for each species studied. Needle phenology of the trees studied was also observed weekly. Initiation of cambial activity and xylogenesis occurred at the end of April for pines and firs, at the beginning of June for spruces. For the 3 species, it occurred a few days after the reactivation of the apical meristems, which is in agreement with the theory of a hormonal regulation of cambial activity. The end of the cellular divisions in the cambial zone occurred between the end of August and the middle of September, depending on the species, while the end of apical meristems activity occurred between the middle of June and the beginning of July. The length of time between these two phenomena suggested that the cessation of cambial activity is not under a hormonal control by the apical meristems. Due to later initiation and more precocious end, cambial activity and xylogenesis phases were shorter for spruces. Extension of these analyses along an altitudinal gradient and over several years will allow a better understanding of the influence of climatic factors on wood formation in general and on the behaviour of the species studied in particular.

KEYWORDS: CAMBIAL ACTIVITY, XYLOGENESIS, CONIFER, TREE-RING, TRACHEIDS, NEEDLE PHENOLOGY.

INTRODUCTION

Si la dynamique intra-annuelle de la formation du bois a déjà fait l'objet de travaux de recherche, ceux-ci ont jusqu'alors principalement été conduits en environnements défavorables. Des études sur la dynamique saisonnière de la formation du bois de diverses espèces de conifères ont par exemple été menées en limite altitudinale pour la forêt (Deslauriers *et al.*, 2008 ; Rossi *et al.*, 2003, 2006 b, 2006 c, 2008 a) et en zone boréale (Antonova *et al.*, 1995 ; Mäkinen *et al.*, 2003, 2008). Par contre, il existe encore peu de données relatives à la dynamique saisonnière de la croissance des arbres en zone tempérée. Des travaux ont été effectués en Pologne (Wodzicki, 1972), en Slovénie (Gricar *et al.*, 2005b ; Gricar, 2007) et en République Tchèque (Horaceck *et al.*, 1999). En zone tempérée française, ce type d'étude est inédit.

Les études sur la dynamique intra-annuelle de la formation du bois se sont principalement intéressées à l'influence des facteurs internes et externes sur la production et la différenciation des nouvelles cellules de bois. La majorité a ainsi cherché à évaluer l'impact des facteurs climatiques sur les dates, les durées et les rythmes de production et de différenciation cellulaire, que ce soit sur une partie ou l'ensemble de la saison (Antonova et Stasova, 1993, 1997 ; Deslauriers et Morin, 2005). D'autres ont porté sur l'impact des facteurs endogènes, comme l'âge cambial (Rossi *et al.* 2008 a), la vitalité des arbres (Gricar *et al.*, 2009) ou les hormones (Sundberg *et al.*, 2000 ; Rossi *et al.*, 2009), sur la régulation de l'activité cambiale. Très peu ont visé à évaluer la variabilité interspécifique de la dynamique intra-annuelle de la formation du bois. En comparant la xylogénèse d'arbres d'espèces différentes poussant dans les mêmes conditions, il a cependant été montré que les dates de début et de fin de la xylogénèse variaient assez fortement entre les espèces (Rossi *et al.*, 2006 b, 2007 ; Gricar, 2007). Il n'y a jamais eu de comparaison interspécifique de la dynamique intra-annuelle de la formation du bois entre l'épicéa, le pin sylvestre et le sapin.

Les travaux sur la dynamique intra-annuelle de la formation du bois en relation avec les facteurs climatiques ont mis en évidence le rôle clé de la température sur l'initiation de l'activité cambiale et de la xyloge-

nèse, en zone boréale et tempérée (Rossi *et al.*, 2007, 2008 b). Le contrôle de la fin de l'activité cambiale et de la xylogénèse par les facteurs climatiques semble plus complexe et reste à clarifier. De même, les mécanismes d'action de ces facteurs sur l'activité cambiale sont à préciser. Théoriquement, l'activité cambiale débute juste en dessous des bourgeons après leur activation puis elle se répand progressivement vers la base du tronc. Les études du rôle régulateur des hormones sur l'activité cambiale ont suggéré que c'est l'auxine produite par les bourgeons qui est impliquée dans ce phénomène de réactivation différentielle (Larson, 1969) et que la poursuite des divisions dans la zone cambiale requiert un apport constant d'auxine (Sundberg *et al.*, 2000). L'initiation et la fin de l'activité des méristèmes apicaux doivent donc précéder respectivement l'initiation et la fin de l'activité cambiale.

Pour ce travail, 5 épicéas, 5 pins sylvestres et 5 sapins d'un peuplement mélangé dans les Vosges du nord ont été sélectionnés. La dynamique intra-annuelle de la formation du bois a été suivie en prélevant hebdomadairement des échantillons de bois sur le tronc des 15 arbres durant la saison de végétation 2008. Des coupes histologiques ont été réalisées à partir des échantillons collectés puis observées en microscopie optique afin de suivre l'activité cambiale et le développement des nouvelles cellules de bois.

L'objectif principal est de déterminer les dates critiques de la xylogénèse et de caractériser la dynamique des phases de production et de différenciation des nouvelles trachéides au cours de la saison pour les trois espèces étudiées. Le suivi de la xylogénèse de 5 épicéas, 5 pins sylvestres et 5 sapins se trouvant dans des conditions de croissance identiques devrait permettre d'évaluer la variabilité interspécifique de la dynamique intra-annuelle de la formation du bois entre ces trois espèces. En outre, la phénologie des aiguilles et l'élongation des nouvelles pousses ont également été observées chaque semaine pour les arbres suivis en même temps qu'étaient effectués les prélèvements. La comparaison de la phénologie des méristèmes axiaux et latéraux permettra de tester l'hypothèse d'un contrôle de l'activité cambiale par des messagers hormonaux foliaires.

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Présentation du site atelier de Grandfontaine

Le site atelier de Grandfontaine est localisé dans le département du Bas-Rhin (67, France), dans la forêt domaniale de Grandfontaine (48°29'Nord, 7°9'Est).

Il se situe à 643 mètres d'altitude, sur la forte pente (20%) d'un versant orienté sud sud-est du massif du Donon dont le sommet proche culmine à 1009 m d'altitude. Les précipitations sont de 1532 mm par an. La température moyenne annuelle est de 7,7°C, avec des moyennes de - 0,5°C et 15,9°C pour les mois de janvier

et juillet. Le nombre de jours de gel par an est de 108. La comparaison des valeurs de température et de précipitation relevées en 2008 avec les valeurs données pour la période 1961 - 1990 a montré que l'année 2008 avait été normale au niveau de ses conditions climatiques. Le peuplement consiste en une futaie de résineux en mélange avec une dominance de sapins accompagnés de pins sylvestres et d'épicéas. Sa surface terrière est de 34,1 m²/ha. L'ensemble des arbres du peuplement a été inventorié et cartographié (Figure 1) ; 5 épicéas communs (*Picea abies* (L.) Karst.), 5 pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.) et 5 sapins pectinés (*Abies alba* Mill.) dominants et en bonne santé ont été sélectionnés. La hauteur de ces arbres a été mesurée et des carottes ont été prélevées à la tarière de Pressler fin 2009 pour estimer leur âge.

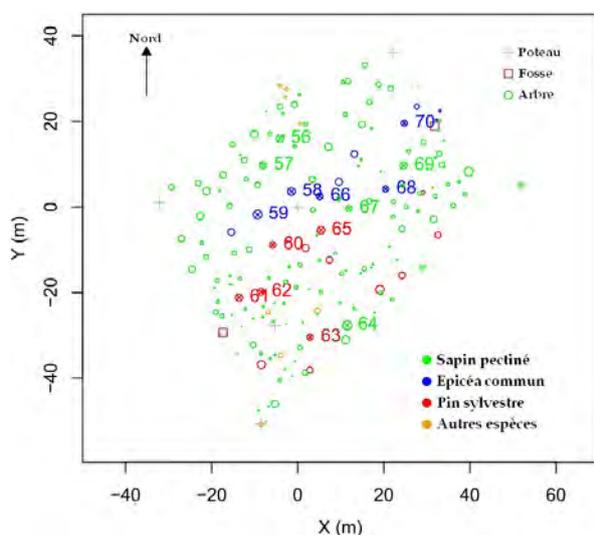


Figure 1 - Cartographie du peuplement mélangé étudié dans la forêt domaniale de Grandfontaine dans les Vosges du nord. Les 15 numéros correspondent aux 15 arbres suivis pendant la saison 2008, soit 5 épicéas (n°58, 59, 66, 68 et 70), 5 pins sylvestres (n° 60, 61, 62, 63 et 65) et 5 sapins (n° 56, 57, 64, 67 et 69).

2 - Acquisition des données

a - Suivi de l'activité cambiale et de la xylogénèse

Pour cette étude, des petits échantillons de bois appelés microcarottes ont été collectés chaque semaine sur le tronc des arbres suivis. Les prélèvements se font à hauteur de poitrine à l'aide d'un poinçon spécifique, le trephor® (Rossi *et al.*, 2006a). Les microcarottes extraites par cet outil font environ 2 mm de diamètre, 15 mm de longueur et contiennent une partie externe avec le phloème et le cambium, et une partie interne avec le cerne en formation et quelques cernes des années précédentes. Dans leur travail méthodologique, Wodzicki et Zajaczkowski (1970)

ont montré qu'un espacement des prélèvements de 1 cm au lieu de 2 cm réduisait la variabilité circonferentielle de moitié. Ils ont de plus montré que l'effet de la blessure due au prélèvement mettait plus d'un mois pour se faire sentir sur le prélèvement suivant situé à 1 cm. Il a donc été choisi d'espacer les prélèvements d'1 cm seulement et de les répéter toutes les semaines. Les prélèvements hebdomadaires ont été effectués du 1 avril au 28 octobre 2008, ce qui représente 31 prélèvements sur l'ensemble de la saison de végétation.

Une fois les microcarottes collectées, elles ont été conservées dans une solution alcoolique (50% d'éthanol) au réfrigérateur puis préparées en laboratoire. On a ensuite utilisé un microtome rotatif pour procéder à la découpe des échantillons à une épaisseur de 5 µm. Enfin, on a procédé à la coloration des coupes histologiques à l'acétate de crésyl violet. Les sections ont alors été observées à l'aide d'un microscope optique (objectifs × 20, × 40 et × 50 à immersion), en lumière blanche et polarisée.

La xylogénèse peut être découpée en trois phases successives : (1) phase de division, (2) phase d'expansion et (3) phase d'épaississement et lignification. La phase de division correspond à la production de nouvelles cellules de bois par divisions des cellules de la zone cambiale. Les nouvelles cellules produites entament un processus de différenciation par la phase d'expansion, durant laquelle le lumen grossit très fortement; suit la phase d'épaississement et lignification, durant laquelle les parois secondaires sont produites et lignifiées. Les cellules issues de ce processus sont les trachéides matures du bois (Wilson *et al.*, 1966 ; Plomion *et al.*, 2001). Sur les sections, on peut distinguer quatre zones cellulaires. Les trois premières correspondent aux trois phases de la xylogénèse, tandis que la quatrième contient les trachéides matures. Pour chaque section, on a ainsi compté pour trois files radiales (Skene, 1969) le nombre de cellules en zone cambiale (*nC*), en zone d'expansion (*nE*), en zone d'épaississement et lignification (*nL*) ainsi que le nombre de cellules matures (*nM*). Les cellules cambiales sont caractérisées par leur petite taille, leur forme rectangulaire et leur paroi primaire fine. Tout comme les cellules cambiales, les cellules en phase d'expansion sont entourées d'une paroi primaire mince et élastique. Leur taille est en revanche bien supérieure (au moins deux à trois fois). Les cellules en phase d'épaississement et lignification ont une paroi secondaire biréfringente en lumière polarisée à cause de l'organisation particulière des microfibrilles de cellulose (Abe *et al.*, 1997). La progression de la lignification des parois secondaires est rendue visible par la coloration au violet de crésyl acétate (Antonova et Shebeko, 1981). La paroi partiellement lignifiée des cellules en zone d'épaississement et de lignification apparaît bleue et violette alors que la paroi entièrement lignifiée des trachéides matures est uniformément bleue.

Cinq dates caractéristiques de la xylogénèse ont été définies à partir des comptages pour décrire le calendrier de la formation du bois. L'initiation des phases d'expansion (t_iE), d'épaississement et lignification (t_iL) et l'apparition des premières cellules matures (t_iM) ont été définies comme les dates auxquelles on observe pour 50 % des files radiales au minimum une première cellule respectivement en zone d'expansion, en zone d'épaississement et lignification et en zone mature. La date d'initiation de la phase d'expansion a également été choisie pour marquer l'initiation de la phase de division, donc de l'activité cambiale et de la xylogénèse. Les fins des phases d'élargissement (t_fE) et d'épaississement et lignification (t_fL) ont été définies comme les dates auxquelles on observe, pour 50% des files radiales au maximum, une dernière cellule respectivement en zone d'expansion et en zone d'épaississement et lignification. La date de fin de la phase d'expansion équivaut à la date de fin de l'activité cambiale. La fin de la phase d'épaississement et lignification signale la fin de la xylogénèse. A l'initiation ou à la fin d'une phase, si le nombre de cellules retrouvées dans la zone correspondante était différent du seuil fixé de une cellule pour 50% des files radiales, une interpolation linéaire était utilisée pour estimer la date exacte (Rathgeber *et al.*, accepté). Ces dates ont permis de définir trois durées caractéristiques de la xylogénèse. La durée de la phase d'expansion (dE) et de la phase d'épaississement et lignification (dL) est la durée qui

sépare l'initiation de la fin de ces phases. La durée de la xylogénèse (dX) est le temps compris entre l'initiation de la phase d'expansion et la fin de la phase d'épaississement et lignification.

b - Suivi de la phénologie foliaire et de l'allongement des pousses

La phénologie foliaire et l'allongement des nouvelles pousses ont été observés chaque semaine à la jumelle pour chaque arbre sélectionné. Pour les bourgeons, les stades de gonflement, d'éclosion puis l'allongement des nouvelles pousses ont été observés. Le gonflement des bourgeons a été choisi pour marquer l'initiation de l'activité des méristèmes apicaux. La maturation des aiguilles a été suivie en observant leur couleur, qui est progressivement passée d'un vert clair à un vert foncé. L'arrêt de l'allongement des pousses couplé à l'observation d'aiguilles matures ont été utilisés pour marquer la fin de l'activité des méristèmes apicaux.

3 - Analyse des données

En raison du faible nombre d'individus à disposition, les comparaisons interspécifiques de dates et de durées des phases ont été faites à l'aide de tests *bootstrap* sur médianes (Rathgeber *et al.*, accepté).

II - RÉSULTATS

1 - Caractéristiques dendrométriques des arbres étudiés

Les mesures de hauteur et de circonférence et la détermination de l'âge des arbres à partir des carottes ont montré que les pins étaient plus âgés et de dimensions plus faibles que les épicéas et les sapins (Figure 2). Les épicéas et les sapins avaient le même âge mais des dimensions différentes. En moyenne, les épicéas étaient plus hauts que les sapins mais avaient des circonférences inférieures. En 2008, les sapins ont

produit en moyenne plus du double de cellules que les épicéas et plus du triple que les pins.

2 - Dynamique de l'activité cambiale et de la xylogénèse

a - Phénologie cambiale et calendrier de la xylogénèse

L'initiation de l'expansion cellulaire, donc de l'activité cambiale et de la xylogénèse, s'est faite à l'extrême fin avril chez les pins ($t_iE = 121 \pm 7$ jours (moyenne \pm écart-type, $n=5$)) et les sapins ($t_iE = 121 \pm 5$ jours) et début mai chez les épicéas ($t_iE = 131 \pm 4$ jours) (Figure 3). La phase d'épaississement et de lignification des parois a commencé mi-mai chez les pins ($t_iL = 138 \pm 3$ jours) et les sapins ($t_iL = 137 \pm 5$ jours), fin mai chez les épicéas ($t_iL = 149 \pm 9$ jours). Les premières cellules matures sont apparues à la toute fin de mai chez les sapins

| | Âge | Circonférence à 1m30 (cm) | Hauteur (m) | Nombre de cellules produites en 2008 |
|----------------|---------------|---------------------------|--------------|--------------------------------------|
| Epicéas | 74 \pm 7,9 | 172 \pm 29,1 | 33 \pm 2,6 | 37 \pm 21 |
| Pins | 119 \pm 5,9 | 166 \pm 15,1 | 27 \pm 2,1 | 27 \pm 17 |
| Sapins | 73 \pm 6,3 | 180 \pm 24 | 31 \pm 1,8 | 88 \pm 34 |

Figure 2 - Caractéristiques dendrométriques et âge des arbres étudiés (moyenne \pm écart-type, $n=5$).

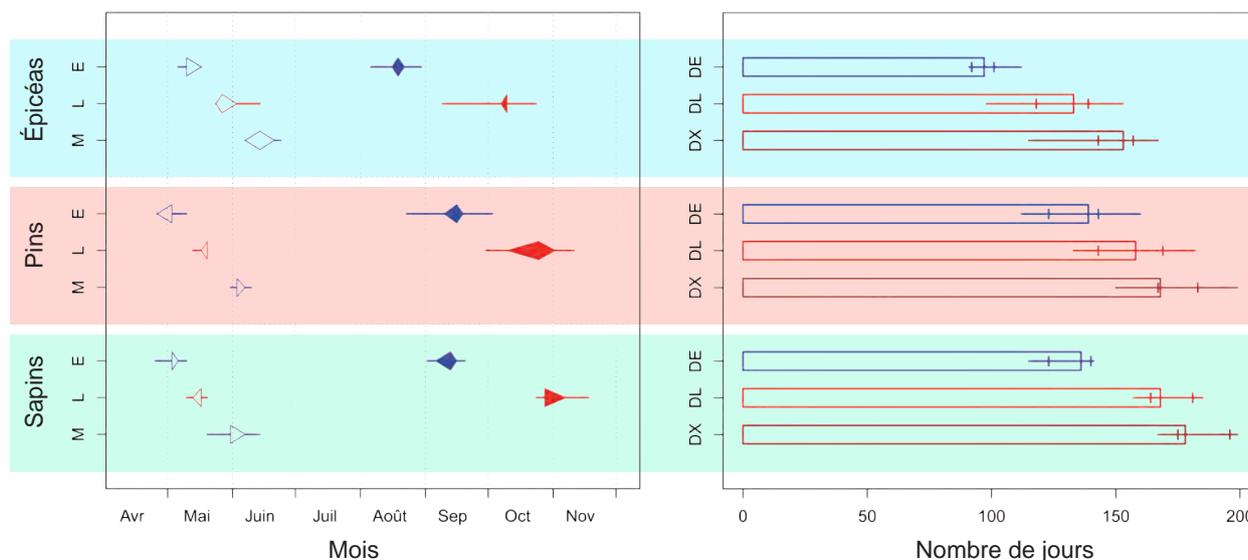


Figure 3 - Dates et durées caractéristiques de la xylogenèse, avec E, L et M les dates pour respectivement la phase d'expansion, la phase d'épaississement et de lignification et l'apparition des premières cellules matures et dE, dL et dX les durées pour respectivement la phase d'expansion, la phase d'épaississement et de lignification et la xylogenèse. Pour chaque date et chaque durée, les 5 arbres sont représentés.

($t_M = 151 \pm 8$ jours), au tout début de juin chez les pins ($t_M = 154 \pm 3$ jours) et mi-juin chez les épicéas ($t_M = 163 \pm 7$ jours). La cessation de l'expansion cellulaire, donc de l'activité cambiale, a eu lieu fin août chez les épicéas ($t_E = 237 \pm 6$ jours), mi-septembre chez les pins ($t_E = 263 \pm 12$ jours) et les sapins ($t_E = 259 \pm 7$ jours). La fin de l'épaississement et de la lignification des parois, donc la fin de la xylogenèse, est intervenue début octobre pour les épicéas ($t_L = 283 \pm 16$ jours), fin octobre pour les pins ($t_L = 300 \pm 17$ jours) et au-delà du 28 octobre pour les sapins ($t_L > 301$ jours). Elle est effectivement indisponible pour quatre sapins (57, 64, 67 et 69) car il reste des cellules en phase d'épaississement et de lignification des parois sur la section correspondant à la dernière date de prélèvement. Pour ces quatre sapins, la fin de la xylogenèse a donc été ultérieure au 28 octobre. La durée de l'activité cambiale a été de trois mois et demi chez les épicéas ($dE = 106 \pm 8$ jours), quatre mois et demi chez les sapins ($dE = 138 \pm 11$ jours) et les pins ($dE = 142 \pm 17$ jours). La durée de la phase d'épaississement et de lignification des parois a été de quatre mois et demi chez les épicéas ($dL = 134$

± 20 jours), de cinq mois et demi chez les pins ($dL = 163 \pm 19$ jours) et de plus de cinq mois et demi chez les sapins ($dL > 160$ jours). La durée de la xylogenèse, c'est-à-dire le temps écoulé entre l'apparition de la première cellule de xylème produite (t_E) et la mort de la dernière trachéide formée (t_L), a été de cinq mois pour les épicéas ($dX = 152 \pm 20$ jours), de 6 mois pour les pins ($dX = 179 \pm 17$ jours) et de plus de 6 mois pour les sapins ($dX > 173$ jours).

Les initiations des phases d'expansion (t_E) et d'épaississement et de lignification (t_L) ont été significativement plus tardives chez les épicéas que chez les pins et les sapins (Figure 4). Les fins des phases d'expansion (t_E) et d'épaississement et lignification (t_L) ont été significativement plus précoces chez les épicéas que chez les pins et les sapins. Du fait d'initiations plus tardives et de fins plus précoces, les durées des phases d'expansion (dE), d'épaississement et lignification (dL) et la durée de la xylogenèse (dX) ont été significativement plus courtes chez les épicéas que chez les pins et les sapins. Il n'y a eu aucune différence significative entre les calendriers des pins et des sapins.

| | Epicéa vs Pin | Epicéa vs Sapin | Pin vs Sapin |
|-------|---------------|-----------------|----------------|
| t_E | 0,025* | 0,006** | 0,313 |
| t_L | 0,001*** | 0,006** | 0,271 |
| t_E | 0,004** | 0,002** | 0,181 |
| t_L | 0,032* | Non disponible | Non disponible |
| dE | 0,001*** | 0,001*** | 0,374 |
| dL | 0,014* | Non disponible | Non disponible |
| dX | 0,026* | Non disponible | Non disponible |

Figure 4 - p-value des comparaisons interspécifiques des dates et des durées des phases de la xylogenèse par tests bootstrap sur médianes, avec t_E et t_L les dates d'initiation des phases respectivement d'expansion et d'épaississement et lignification, t_E et t_L les dates de fin des phases respectivement d'expansion et d'épaississement et lignification, et dE , dL et dX les durées respectivement des phases d'expansion, d'épaississement et lignification et de la xylogenèse. Les seuils de significativité correspondent à *significatif (p -value ≤ 0.05), **hautement significatif (p -value ≤ 0.01) et ***très hautement significatif (p -value ≤ 0.001).

b - Dynamique des phases

De manière très générale, l'évolution du nombre de cellules au cours de la saison a décrit trois courbes en cloche décalées dans le temps pour les trois phases de la xylogénèse et une courbe à l'allure sigmoïde pour les trachéïdes matures (Figure 5). L'augmentation du nombre de cellules en zone cambiale a été synonyme de réactivation de l'activité cambiale par divisions actives des cellules de la zone cambiale. Le nombre de cellules dans la zone cambiale a atteint rapidement un maximum, en passant en moyenne d'environ 6 à 9 pour les épicéas, de 6 à 10 pour les pins et de 7 à 10 pour les sapins. L'apparition des premières cellules en expansion a été concomitante au début de l'augmentation du nombre de cellules en zone cambiale. Ceci signifie que les premières cellules filles issues des divisions cambiales sont entrées très rapidement en phase d'expansion et donc que les initiations des deux phases ont été très proches. Plus tard sont apparues les premières cellules en épaissement et lignification, puis les premières cellules matures. Pour les trois espèces, l'accroissement du nombre de cellules

en expansion et la valeur de ce nombre ont été les plus élevés au début de la saison de croissance, ce qui a caractérisé la phase de production cellulaire maximale. Pour les pins et les sapins, le nombre de cellules en expansion a été maximum à la mi-mai, avec en moyenne entre 5 et 6 cellules dans la zone d'expansion des pins et 5 cellules dans celle des sapins. Pour les épicéas, le maximum a été atteint début juin avec 5 cellules en zone d'expansion. On a dénombré début juin en zone d'épaississement et lignification un premier maximum de 6 cellules pour les pins et de plus de 14 cellules pour les sapins. Pour les épicéas, on a dénombré un premier maximum de 7 cellules en zone d'épaississement et lignification mi-juin.

Après augmentation et atteinte du maximum de début de saison, le nombre de cellules dans la zone cambiale des épicéas et des pins a progressivement diminué. En fin de saison, il a retrouvé une valeur correspondant au nombre de cellules observé dans la zone cambiale au repos en début de saison. Pour les sapins, la diminution du nombre de cellules dans la zone cambiale a été rapide. Le nombre de cellules cambiales est ensuite resté constant jusqu'à une deuxième aug-

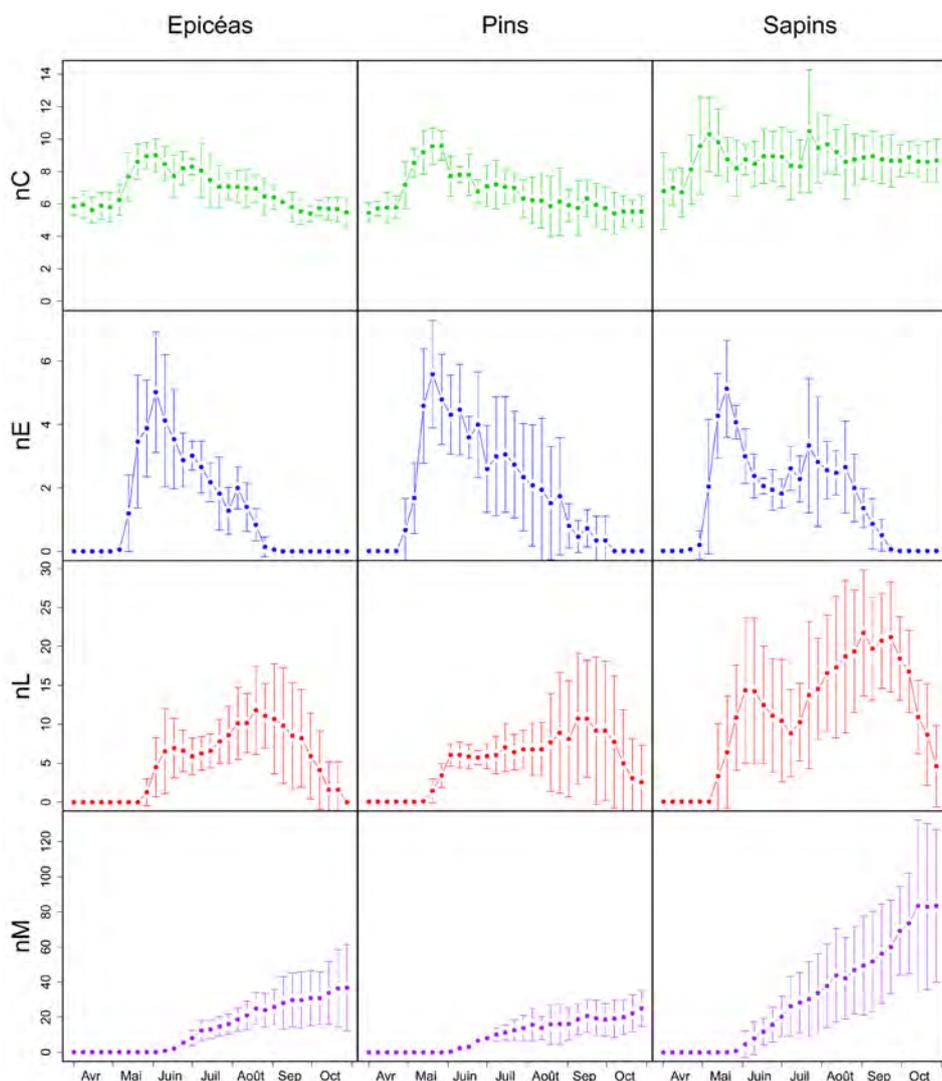


Figure 5 - Évolution du nombre de cellules dans la zone cambiale (nC), la zone d'expansion (nE), la zone d'épaississement et lignification (nL) et la zone mature (nM) des épicéas communs, des pins sylvestres et des sapins pectinés au cours de la saison 2008. Les points et les barres représentent respectivement la moyenne et l'écart-type pour 5 arbres.

mentation entre mi-juillet et début août, rapidement suivie par une diminution. Enfin le nombre de cellules cambiales a stagné le reste de la saison, à une valeur pourtant supérieure au nombre de cellules cambiales observées avant la reprise de l'activité cambiale. Le profil de la phase d'expansion a été similaire, avec pour les épicéas et les pins une diminution progressive du nombre de cellules après le maximum de début de saison. Le retour à une valeur nulle en fin de saison a signifié la fin des divisions et de l'expansion cellulaire. Pour les sapins, le nombre de cellules a diminué brutalement après l'atteinte du maximum de début de saison mais une seconde augmentation a été observée entre fin juin et mi-juillet. Le nombre de cellules en expansion a ensuite diminué jusqu'à la fin de la saison pour retourner à une valeur nulle. Pour la phase d'épaississement et lignification, un aspect bimodal a été observé pour les trois espèces. Après atteinte du premier maximum de début de saison, il y a eu stagnation ou diminution du nombre de cellules et atteinte d'un deuxième maximum tardif plus important. Celui-ci est survenu mi-août pour les épicéas, mi-septembre pour les pins et les sapins avec respec-

tivement 12, 11 et 22 cellules en moyenne. Le nombre de cellules en zone d'épaississement et lignification a ensuite diminué jusqu'à la fin de la saison.

3 - Phénologie foliaire

Des bourgeons gonflés ont été observés pour tous les arbres le 29 avril, ce qui signifie que la reprise de l'activité des méristèmes apicaux s'est faite peu de temps avant le 29 avril pour les trois espèces. L'éclosion des bourgeons s'est produite entre le 29 avril et le 6 mai pour les pins, entre le 6 et le 20 mai pour les sapins et entre le 13 et le 27 mai pour les épicéas. L'élongation des pousses s'est ensuite poursuivie jusqu'entre le 10 et le 17 juin pour les pins, entre le 10 et le 24 juin pour les épicéas et les sapins. Pour les trois espèces, les aiguilles étaient matures durant la semaine suivant la fin de l'allongement des pousses. Ceci signifie que la fin de l'activité des méristèmes apicaux est intervenue entre le 17 et le 24 juin pour les pins, entre le 17 juin et le 1 juillet pour les épicéas et les sapins.

III - DISCUSSION

1 - Comparaison avec les dates relevées dans la littérature

En général, la xylogénèse des conifères en climat tempéré commence entre mi-avril et début juin et se termine entre fin août et début novembre. La production cellulaire se termine entre la fin de juillet et le début de septembre (Wodzicki, 1972 ; Gricar, 2007). Les dates relevées dans les Vosges du nord sont donc comprises dans les fourchettes de dates rapportées dans la littérature. Au vu de l'étendue des dates données, on constate cependant la grande variabilité des dates caractéristiques de la xylogénèse en zone tempérée. La diversité géographique des zones étudiées suggère un fort impact des facteurs environnementaux dans la régulation de la dynamique saisonnière de l'activité cambiale et de la xylogénèse. En environnement froid (zone boréale ou altitudinale), la xylogénèse des conifères commence entre mi-mai et fin juin et se termine entre fin juillet et fin septembre. La production cellulaire se termine entre mi-juillet et fin août (Rossi *et al.*, 2006b ; Mäkinen *et al.*, 2008). Du fait de leurs initiations plus tardives et de leurs cessations plus précoces, l'activité cambiale et la xylogénèse des conifères en environnement froid se font dans des laps de temps beaucoup plus courts. Ces différences de dates entre les zones boréale et tempérée soulignent le rôle critique de la température dans l'initiation et la cessation des phases de la xylogénèse.

2 - Comparaisons interspécifiques

A partir d'échantillons récoltés en forêt d'Amance (Lorraine, nord-est de la France) durant l'année 2006, l'étude comparative de la dynamique saisonnière de la xylogénèse du pin sylvestre et du sapin avait montré que la xylogénèse des pins commençait 20 jours avant celle des sapins. Etant donnée la proximité géographique des deux sites, on s'attendait à retrouver cette différence dans les Vosges du nord. Or, l'initiation de la xylogénèse des pins et celle des sapins y ont été synchrones. Par comparaison de la dynamique intra-annuelle de la xylogénèse d'arbres d'âges différents, il a été montré qu'au sein d'une espèce, la xylogénèse des individus âgés commence significativement plus tard (Rossi *et al.*, 2008a). De plus, en comparant la dynamique intra-annuelle de la formation du bois pour des conifères appartenant à trois classes différentes de statut social, il a été démontré que des arbres dominés avaient une xylogénèse plus courte en raison de son initiation plus tardive et de sa fin plus précoce (Rathgeber, 2010). On peut donc penser que l'âge plus élevé et la taille plus petite des pins ont retardé l'initiation de leur xylogénèse, d'où le synchronisme observé avec les sapins. L'idéal pour faire des comparaisons interspécifiques aurait été d'avoir des individus du même âge et de taille identique poussant dans les mêmes conditions. Les différences d'âges constatées dans cette étude semblent cependant logiques au vu

de l'autécologie des espèces. Le pin sylvestre, essence pionnière, s'est implanté en premier et a apporté les conditions favorables à l'implantation ultérieure de l'épicéa et du sapin.

Les comparaisons interspécifiques ont montré que les initiations des phases de la xylogénèse des épicéas étaient plus tardives. Les différences interspécifiques ont cependant été les plus fortes au niveau de la fin de la saison de végétation, avec pour chaque phase les épicéas qui finissaient plus tôt. Ces différences de dates se répercutaient sur les durées des phases qui ont été les plus courtes chez les épicéas. Concernant la phase de division, le nombre de cellules produites est déterminé par la dynamique et la durée des divisions cellulaires dans la zone cambiale (Rossi *et al.*, 2006b, 2007). Pourtant, en dépit d'une phase de division plus longue que celle des épicéas et de même durée que celle des sapins, les pins ont produit moins de cellules que ces deux espèces. Les pins ont donc eu des taux de production cellulaire plus faibles. Cela peut être imputé à leur âge plus important, car des individus plus âgés ont des taux de production cellulaire inférieurs (Rossi *et al.*, 2008a). La phase de division a été beaucoup plus longue chez les sapins que chez les épicéas et les sapins ont produit un nombre de cellules beaucoup plus important. A la différence des pins, les sapins semblent donc avoir profité d'une durée plus importante de la phase de division pour produire un plus grand nombre de cellules que les épicéas. Cette différence est cependant étonnante compte tenu de l'âge similaire des deux espèces et du fait que l'épicéa est réputé avoir une croissance plus forte que le sapin. Concernant les autres phases, Gricar *et al.* (2005b) ont montré que la durée de la phase d'expansion influençait la durée de la phase de lignification. Plus la phase d'expansion est longue et plus la synthèse des parois secondaires est longue également. Ici, les différences entre les espèces observées pour la fin de la phase d'expansion sont les mêmes que celles pour la fin de la phase d'épaississement et de lignification et il semblerait donc que les deux variables soient liées.

3 - Comparaison de la phénologie cambiale avec la phénologie foliaire et l'allongement des pousses

L'initiation de l'activité cambiale s'est faite en moyenne à l'extrême fin avril pour les pins et les sapins et début mai pour les épicéas, tandis que l'initiation des méristèmes apicaux s'est faite fin avril pour les trois espèces. La proximité temporelle de l'initiation des deux phénomènes ne permet pas de remettre en cause l'existence d'une régulation cambiale par les méristèmes apicaux. En comparant la croissance des aiguilles et des nouvelles tiges avec la xylogénèse de trois espèces de conifères, Rossi *et al.* (2009) ont observé une réactivation cambiale plus précoce que la croissance des aiguilles et des nouvelles pousses. Ils ont donc rejeté l'hypothèse d'un contrôle de la réactivation cambiale par les méristèmes apicaux. A la différence de notre étude, ils ont utilisé l'éclosion des bourgeons, et non pas le gonflement qui la précède, pour marquer l'initiation de l'activité des méristèmes apicaux. C'est cette différence dans le marquage de l'initiation de l'activité des méristèmes apicaux qui nous a amené à des conclusions différentes, alors que nos observations se rejoignent. En effet, en choisissant l'éclosion des bourgeons, nous aurions également conclu à l'absence d'un contrôle de la réactivation cambiale par les méristèmes apicaux car l'éclosion des bourgeons est intervenue après la réactivation cambiale pour les trois espèces. On peut penser que l'observation de l'éclosion des bourgeons conduit à surestimer la date d'initiation des méristèmes apicaux, car elle ne tient pas compte des phénomènes actifs qui surviennent dans le bourgeon avant son éclosion.

La fin de la mise en place des aiguilles s'est faite entre mi-juin et début juillet pour les trois espèces alors que la fin des divisions est intervenue entre fin août et mi-septembre en fonction de l'espèce. Pour chaque arbre, la fin des divisions est survenue au moins deux mois après la fin de la mise en place des aiguilles. Ce très long laps de temps entre la cessation des deux phénomènes suggère que la fin de l'activité cambiale ne serait pas soumise à un contrôle par les méristèmes apicaux.

CONCLUSION

La dynamique saisonnière de la formation du bois des trois espèces (épicéa commun, pin sylvestre et sapin pectiné) a donc été caractérisée à travers la détermination des dates et des durées caractéristiques de la xylogénèse et le suivi de la dynamique des phases de production et de développement cellulaire au cours de la saison. L'initiation de l'activité cambiale, donc de la xylogénèse, s'est faite à l'extrême fin avril pour les pins et les sapins et début juin pour les épicéas. Elle

était très proche de l'initiation de l'activité des méristèmes apicaux. La fin de l'activité cambiale est intervenue fin août pour les épicéas, mi-septembre pour les pins et les sapins. Dans tous les cas, elle était beaucoup plus tardive que la fin de la mise en place des aiguilles. Ces résultats ont montré que les méristèmes apicaux n'auraient une influence que sur le début de l'activité cambiale. La xylogénèse s'est terminée début octobre pour les épicéas, fin octobre pour les pins et

plus tard pour les sapins. L'épicéa s'est distingué du pin et du sapin par des initiations plus tardives et des fins plus précoces, et donc par des durées plus courtes des phases de la xylogénèse. Le sapin a profité de sa durée plus longue de l'activité cambiale pour avoir une croissance plus forte que l'épicéa. Les comparaisons avec les données de la littérature ont mis en évidence des différences relativement importantes dans les dates caractéristiques de la xylogénèse des conifères. La diversité des aires géographiques étudiées nous pousse à croire que les facteurs environnementaux modulent fortement la dynamique de croissance des arbres et doi-

vent être inclus à l'étude. Le travail va ainsi se poursuivre par l'étude sur plusieurs années de la dynamique saisonnière de la xylogénèse de trois peuplements mélangés (épicéa commun, pin sylvestre et sapin pectiné) étagés selon un gradient altitudinal au massif du Donon (Vosges du Nord). Comparer les dynamiques de croissance d'une année à l'autre pour les mêmes arbres sur un gradient altitudinal nous permettra de mieux comprendre l'impact des facteurs climatiques sur la formation du bois et sur le comportement des espèces étudiées.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement les techniciens qui ont collecté et préparé les échantillons : Emmanuel Cornu, Etienne Farré, Pierre Gelhaye, Maryline Harroué et Alain Mercanti.

Un remerciement est également adressé à François Lebourgeois et Paulina Pinto, qui par leurs avis éclairés ont participé à la progression du travail.

Cette étude a été financée par la région Lorraine et le Ministère de la recherche et de l'enseignement supérieur.

BIBLIOGRAPHIE

- ABE H., FUNADA R., OHTANI J., FUKAZAWA K., 1997. Changes in the arrangement of cellulose microfibrils associated with the cessation of cell expansion in tracheids. *Trees*, 11, 328-332.
- ANTONOVA G.F., SHEBEKO V.V., 1981. Applying cresyl violet in studying wood formation. *Khimiya Drevesiny*, 4, 102-105.
- ANTONOVA G.F., STASOVA V.V., 1993. Effects of environmental factors on wood formation in Scots pine stems. *Trees*, 7, 214-219.
- ANTONOVA G.F., STASOVA V.V., 1997. Effects of environmental factors on wood formation in larch (*Larix sibirica* Ldb) stems. *Trees*, 11, 462-468.
- ANTONOVA G.F., CHERKASHIN V.P., STASOVA V.V., VARAKSINA T.N., 1995. Daily dynamics in xylem cell radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 10, 24-30.
- DESLAURIERS A., MORIN H., 2005. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables. *Trees*, 19, 402-408.
- DESLAURIERS A., ROSSI S., ANFODILLO T., SARACINO A., 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology*, 26, 863-871.
- GRIČAR J., ČUFAR K., OVEN P., SCHMITT U., 2005a. Differentiation of terminal latewood tracheids in silver fir during autumn. *Annals of Botany*, 95, 959-965.
- GRIČAR J., ZUPANČIČ M., ČUFAR K., OVEN P., 2005b. Xylem formation in Norway spruce at two growth sites in Slovenia in years 2002 and 2003. V: Eurodendro 2005: international conference of dendrochronology: September, 28th-October 2nd 2005, Viterbo, Italy. Viterbo, Sette citta: 51.
- GRIČAR J., 2007. Xylo- and phloemogenesis in silver fir (*Abies alba* Mill.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). PhDThesis, Slovenian Forestry Institute, 106 p.
- GRIČAR J., KRZE L., CUFAR K., 2009. Number of Cells in Xylem, Phloem and Dormant Cambium in Silver Fir (*Abies alba*), in Trees of Different Vitality. *IAWA Journal*, 30, 121-133.
- HORACEK P., SLEZINGEROVA J., GANDELOVA. 1999. Effects of environment on the xylogenesis of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). In WIMMER R., VETTER R.E. (ed.). Tree-Ring Analysis. Biological, Methodological and Environmental Aspects. CABI Publishing, 33-54.
- LARSON P. R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. Yale University, School of Forestry, 54 p.
- MÄKINEN H., NÖJD P., SARANPÄÄ P., 2003. Seasonal changes in stem radius and production of new tracheids in Norway spruce. *Tree Physiology*, 23, 959-968.
- MÄKINEN H., SEO J.W., NÖJD P., SCHMITT U., JALKANEN R., 2008. Seasonal dynamics of wood formation: a comparison between pinning, microcoring and dendrometer measurements. *European Journal Forest Research*, 127, 235-245.
- PLOMION C., LEPROVOST G., STOKES A., 2001. Wood Formation in Trees. *Plant Physiology*, 127, 1513-1523.
- RATHGEBER C.B.K., LONGUETAUD F., MOTHE F., LE MOGUÉDEC G., accepté. Studying cambial activity and wood formation phenology: data elaboration, visualization and analysis using R. *Dendrochronologia*.
- RATHGEBER C.B.K., 2010. Influence du statut social des arbres sur la dynamique intra-annuelle de la formation du bois. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009. *Collection EDYTEM*, 11, 29-38.

- ROSSI S., DESLAURIERS A., MORIN H., 2003. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia*, 21, 33-39.
- ROSSI S., ANFODILLO A., MENARDI R., 2006a. Trepbor: a new tool for sampling microcores from tree stems. *IAWA Journal*, 27, 89-97.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., 2006b. Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: an example at the alpine timberline. *IAWA Journal*, 27, 383-394.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., MORIN H., SARACINO A., MOTTA R., BORGHETTI M., 2006c. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 170, 301-310.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., CARRARO V., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152, 1-12.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., ANFODILLO T., CARRER, M. 2008a. Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytologist*, 177, 199-208.
- ROSSI S., DESLAURIERS A., GRICAR J., SEO J.W. RATHGEBER C.B.K., ANFODILLO T., MORIN H., LEVANIC T., OVEN P., JALKANEN R., 2008b. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 696-707.
- ROSSI S., RATHGEBER C. B. K., DESLAURIERS A., 2009. Comparing needle and shoot phenology with xylem development on three conifer species in Italy. *Annals of Forest Science*, 66.
- SKENE D.S., 1969. The period of time taken by cambial derivatives to grow and differentiate into tracheids in *Pinus radiata*. *Annals of Botany*, 33, 253-262.
- SUNDBERG B., UGGLA C., TUOMINEN H. 2000. Cambial growth and auxin gradients. V: Cell and Molecular Biology of Wood Formation. Savidge R.A., Barnett J.R., Napier R. (eds.). BIOS Scientific Publishers Limited, Oxford, UK, 169-188.
- WILSON B.F., WODZICKI T.J., ZAHNER R., 1966. Differentiation of cambial derivatives: proposed terminology. *Forest Science*, 12, 438-440.
- WILSON B.F., 1971. The growing tree, revised edition 95 - 117. Amherst: The University of Massachusetts Press.
- WODZICKI T.J., ZAJACZKOWSKI S., 1970. Methodical problems in studies on seasonal production of cambial xylem derivatives. *Acta societatis botanicorum poloniae*, 39, 509-520.
- WODZICKI T.J., 1972. Mechanism of xylem differentiation in *Pinus sylvestris* L. *Journal of experimental botany*, 22, 670-687.

Complexité des facteurs prédisposants la mortalité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) sur le Mont Ventoux

CAILLERET M.¹, DAVI H.¹, XIE Y.², CHANZY A.²

¹ *Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM), INRA, Avignon.*

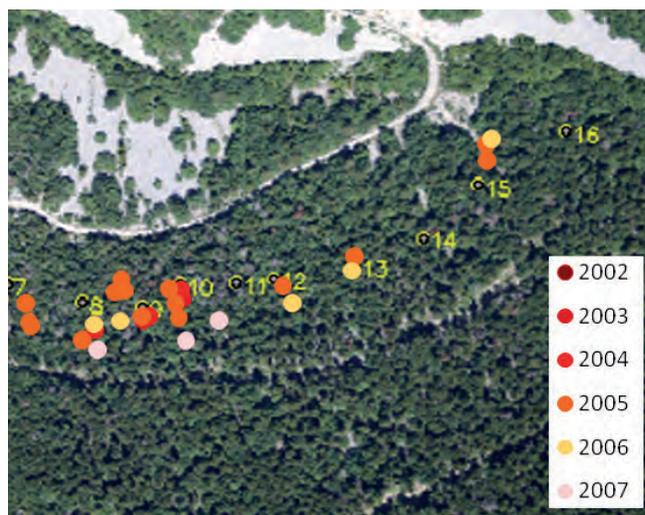
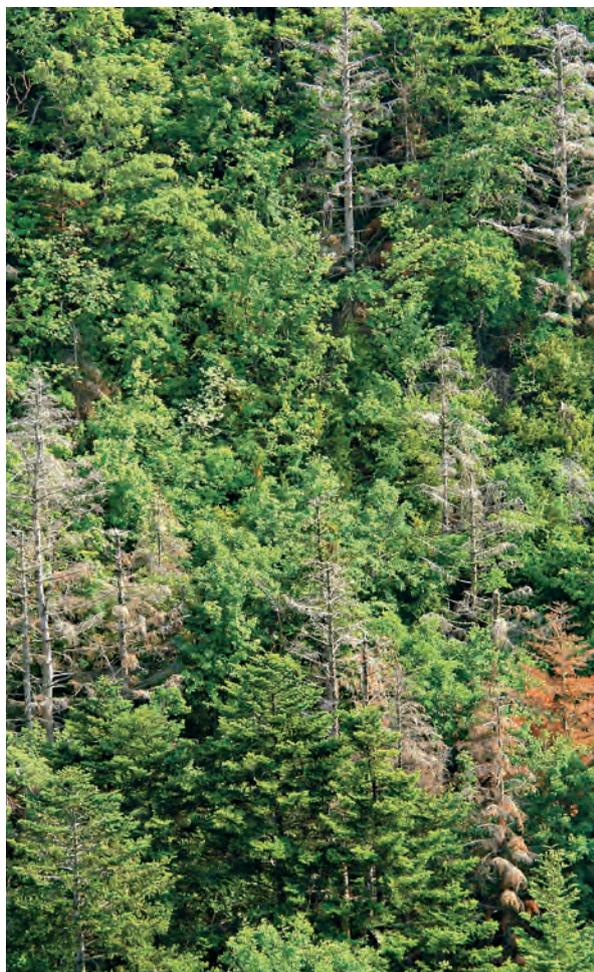
² *Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (EMMAH), INRA, Avignon.*

Contact : maxime.cailleret@avignon.inra.fr

RÉSUMÉ

Depuis le début du XXI^e siècle, de nombreux phénomènes de dépérissement de sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) ont été notés en France (DSF, 2006). Sur le Mont Ventoux, montagne située en zone méditerranéenne, l'accumulation des sécheresses estivales (baisse des précipitations et augmentation des températures) entre 2000 et 2006 a entraîné un déclin continu de la croissance du sapin. Le dépérissement et la mortalité d'arbres y sont d'autant plus importants (jusqu'à 70% de sapins morts) que le sapin se situe en limite sèche de répartition et que de nombreux pathogènes y sont présents.

L'analyse du phénomène de dépérissement à large échelle spatiale (massif) révèle que les sites secs (basse altitude, exposition Sud) sont les plus vulnérables. A contrario, l'étude réalisée à fine échelle (placette) indique que les zones avec le plus de mortalité sont celles où le sol est fertile en surface. L'analyse de la croissance passée des sapins va dans le même sens, en révélant que les morts ont eu, en moyenne, une croissance plus élevée que les vivants dans les stades juvéniles (de 0 à 40 ans ; âge à 130 cm), et sont aussi plus sensibles aux variations climatiques inter-annuelles. L'analyse dendroclimatique indique que leur croissance est plus affectée que les vivants par les conditions estivales de l'année en cours (impact négatif des fortes températures et des faibles précipitations), ce qui se retrouve donc en analysant la variabilité de la largeur du bois final. Le couplage des données dendrochronologiques et d'état sanitaire avec la caractérisation du sol par des méthodes géophysiques (résistivité) indique que les processus de croissance et de dépérissement n'ont pas les mêmes contrôles : le niveau de croissance moyen d'un arbre semble être dépendant de la fertilité du sol en surface (0-3m) alors que son niveau de résistance semble plutôt dépendre des conditions en profondeur (> 3m).



Mont Ventoux - Analyse du dépérissement, date de mort (dernier cerne).

Mortalité du sapin pectiné sur le versant nord du Mont Ventoux (photo M. Cailleret).

Analyse du cerne 2003 dans les données de l'Inventaire forestier national

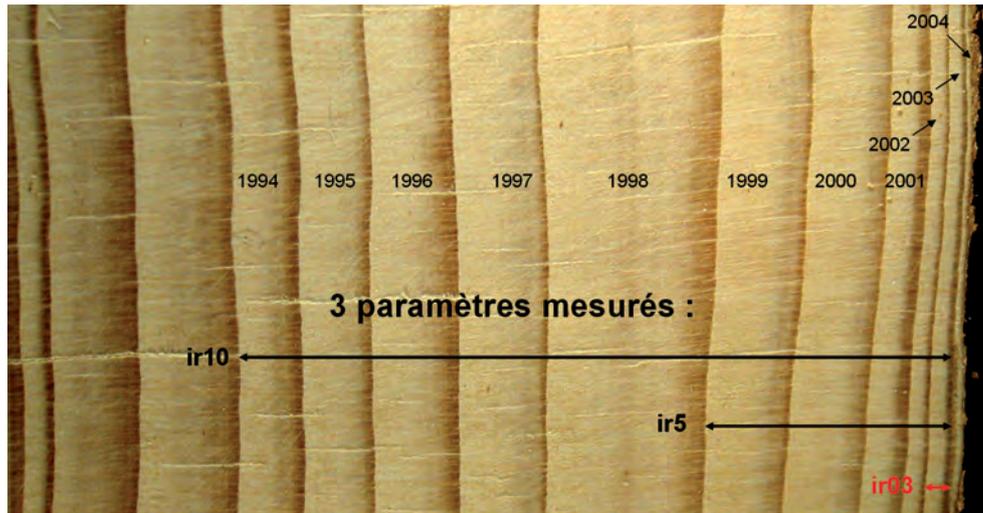
GIRARD Q.

Laboratoire d'Ecologie & Ecophysiologie Forestière,
Equipe Phytoécologie forestière, INRA, 54280 Champenoux.

Contact : dupouey@nancy.inra.fr

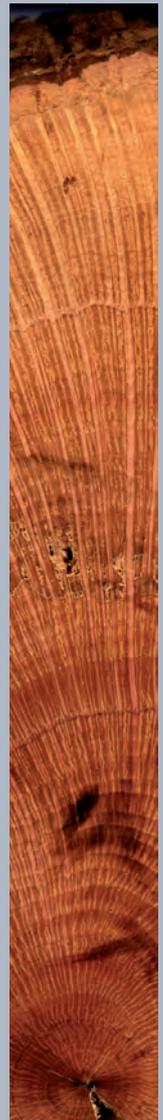
RÉSUMÉ

Non communiqué.



Mesure des cernes la la décennie 1994-2004. Photo Q. Girard.

Dendroclimatologie



Au recto :

En haut à gauche : forêt de Pin cembro en limite altitudinale (Ceillac, Hautes-Alpes ; photo B. Talon)

À droite : cerne de gel de 1985, chêne vert (photo C. Corona).

En bas à gauche : partie d'une poutre (sablière) en mélèze provenant d'une grange d'altitude (Névache, Hautes-Alpes ; photo J.-L. Edouard).

RECONSTRUCTION DES TEMPERATURES ESTIVALES DANS LES ALPES FRANCAISES AU MOYEN DE DONNÉES DENDROCHRONOLOGIQUES (749-2008 AD)

*LAST-MILLENNIUM SUMMER-TEMPERATURE VARIATIONS IN THE FRENCH ALPS
RECONSTRUCTED FROM A DENDROCHRONOLOGICAL NETWORK (AD 749-2008)*

CHRISTOPHE CORONA¹, JEAN -LOUIS EDOUARD², FREDERIC GUIBAL¹,
JOEL GUIOT³, SYLVAIN BERNARD¹, ANDRÉ THOMAS¹, NICOLE DENELLE¹

¹ IMEP-UMR 6116 du CNRS, Europôle méditerranéen de l'Arbois, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4

² Centre Camille Julian/CNRS/MMSH, 5 rue du Château de l'Horlog, BP 647, F 13094 Aix-en-Provence cedex.

³ CEREGE /CNRS, Aix-Marseille Université, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

Contact : christophe.corona@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans les Alpes, trois reconstructions de températures estivales, issues de chronologies de largeurs de cernes couvrent les 1000 dernières années. Aucune reconstruction millénaire n'avait été spécifiquement consacrée aux parties méridionale et occidentale de la chaîne, en raison, principalement, de la rareté du matériel dendrochronologique au début du dernier millénaire. Cette lacune est comblée ici. Un réseau de 34 chronologies pluri-centennaires a été utilisé afin de reconstruire les températures estivales dans les Alpes françaises. Ce réseau combine 548 séries individuelles de largeurs de cernes provenant de prélèvements réalisés au niveau de la limite supérieure de la forêt, sur des arbres vivants ou morts ainsi que sur des bois de construction. Ces séries ont été standardisées au moyen d'une courbe de croissance régionale adaptative afin de préserver au mieux les variabilités de basse et moyenne fréquences. Une fonction de transfert a été établie entre les données standardisées et les températures estivales (JJA) homogénéisées du réseau HISTALP. Cette fonction combine la technique des analogues, afin de reconstituer les séries trop courtes, l'utilisation d'un réseau de neurones, pour une calibration non linéaire optimale et une quantification de la marge d'erreur au moyen de la méthode bootstrap. 50% de la variance des températures est reconstituée par cette méthode. La reconstruction met en évidence un optimum climatique médiéval qui se prolonge jusqu'en 1500 mais également des phases froides synchrones avec l'avancée des glaciers suisses, avant l'an mille notamment. Le petit âge glaciaire (PAG) est relativement doux jusqu'en 1660 comparé aux autres reconstructions alpines puis les températures diminuent fortement jusqu'en 1920 (-0,7°C par rapport à la moyenne 1961-1990).

MOTS-CLÉS : DENDROCHRONOLOGIE, RECONSTRUCTION CLIMATIQUE, LARIX DECIDUA (MILL.), DERNIER MILLÉNAIRE, ALPES FRANÇAISES.

ABSTRACT

To date, in the Alps, only three reconstructions extend back prior to 1000AD. This lack is related to the scarcity of wood material in the western and southern parts of the Alps, especially during the early part of the last millennium. On the basis of a dense tree-ring width network (34 unpublished multi centennial larch chronologies), this paper attempts, for the first time, a reconstruction of the summer temperatures over the French Alps. This network combine 548 tree-ring width series from living trees, dead trees and construction wood. All sites sampled are located near tree-line in high-altitude forest stands. The Adaptive Regional Growth Curve standardization method was applied to preserve interannual to multicentennial variations in this high-elevation proxy dataset. The proxies are calibrated using the June to August mean temperatures from the last revised version of the HISTALP database. The method combines an analogue technique, which is able to extend the too short tree-ring series, an artificial neural network technique for an optimal non-linear calibration including a bootstrap technique for calculating error assessment on the reconstruction. About 50% of the temperature variance is reconstructed. The proxy record evidences a prolonged Medieval Warm Period persisting until 1500 with warm periods that resemble twentieth century conditions but also cold phases before 1000 synchronous to the Swiss glacier advances. The Little Ice Age is rather mild until 1660 if compared to other alpine reconstructions. Then, summers are 0.7°C cooler than the 1961–1990 mean until 1920.

KEYWORDS: DENDROCHRONOLOGY, CLIMATE RECONSTRUCTION, LARIX DECIDUA (MILL.), LAST MILLENNIUM, FRENCH ALPS.

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont été consacrées aux variations des températures dans les Alpes. Elles sont basées sur des observations instrumentales (Böhm *et al.*, soumis), des documents historiques (Le Roy Ladurie, 1967), les variations des bilans de masse glaciaire (Holzhauser *et al.*, 2005) ou sur des combinaisons de proxies (Casty *et al.*, 2005). Du point de vue des reconstructions dendrochronologiques, les Alpes sont favorisées par de longues séries instrumentales qui remontent jusqu'au milieu du 18^e siècle (Auer *et al.*, 2007 ; Böhm *et al.*, soumis) ce qui permet une calibration des relations cernes/climat et une vérification indépendante sur des périodes exceptionnellement longues (Frank et Esper, 2005). De nombreuses reconstructions ont été produites à partir de chronologies locales ou de compilations régionales mais la plupart couvre seulement 300 à 500 ans (Jansen *et al.*, 2008). Le refroidissement du Petit Age Glaciaire (PAG) apparaît ainsi synchrone dans de nombreux sites malgré des amplitudes variables (Guiot *et al.*, 2005). En revanche, seules trois reconstructions alpines couvrent le dernier millénaire (Büntgen *et al.*, 2005, 2006 ; Corona *et al.*, 2009), en raison essentiellement de la rareté du matériel dendrochronologique avant le XV^e siècle. Ces reconstructions sont centrées sur la Suisse et l'Autriche (Büntgen *et al.*, 2005, 2006) ou sur l'ensemble de l'Arc Alpin (Corona *et al.*, 2009). Aucune n'est centrée sur les Alpes françaises

influencées par trois systèmes synoptiques, continental, océanique et méditerranéen. De ce fait, l'optimum climatique médiéval (Lamb, 1976), et notamment son extension spatiale, sont, par exemple, encore mal connus à l'échelle de l'arc alpin.

Dans cette étude, les températures estivales dans les Alpes françaises (749-2008) sont reconstruites à partir d'un réseau de 34 populations de mélèzes (*Larix decidua* Mill.). Ce réseau combine des arbres vivants, des arbres morts ainsi que des bois de construction situés au niveau de la limite supra forestière. Notre objectif est d'améliorer la compréhension de la variabilité climatique dans les Alpes notamment au cours de l'optimum climatique médiéval.

Dans une première partie, nous décrivons le matériel dendrochronologique utilisé. Puis, nous aborderons ensuite succinctement la procédure utilisée afin de préserver au mieux les signaux de basses et de moyennes fréquences contenus dans le signal dendrochronologique. Cette procédure combine une standardisation au moyen d'une courbe de croissance régionale adaptative (ARGC) (Nicault *et al.*, 2010), une estimation des données manquantes au moyen de la méthode des analogues puis une calibration des relations cernes / climat au moyen d'un réseau de neurones artificiel (Guiot *et al.*, 2005). La reconstruction est finalement comparée aux autres reconstructions alpines.

I - MATERIEL ET MÉTHODE

1 - Présentation du matériel utilisé

a - Matériel dendrochronologique

Les chronologies de largeurs de cernes sont issues de 34 sites distribués dans les Alpes françaises (44°00'-45°30'N, 6°30'-7°45'E, Figure 1). Au total, 548 mélèzes ont été échantillonnés à proximité de la limite supra-forestière dans des peuplements de haute altitude (1600-2300 m). Ce réseau intègre des arbres vivants, des arbres morts et inclut également des séries provenant de bois de construction (Edouard et Thomas, 2008). Ces chronologies moyennes débutent entre 751 et 1862 et se terminent entre 1894 et 2008. Elles regroupent un nombre d'arbres très variable (5 pour celle du Lac de Sainte Anne, 88 pour Névache Granges). La croissance moyenne annuelle varie de 0,35 mm/an (Merveilles) à 2,57 mm/an (Pas d'Archail). La longueur moyenne des séries est comprise entre 71 ans (Pas d'Archail) et 486 ans (Merveilles), 118 échantillons (séries) dépassent 500 cernes. Ce paramètre est important car il conditionne la reconstruction des basses fréquences (Cook *et al.*, 1995).

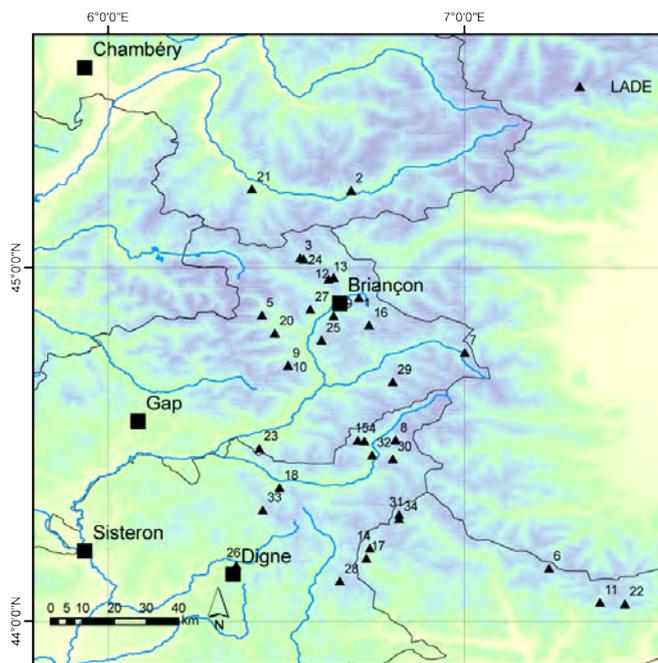


Figure 1 - Localisation des populations étudiées.

b - Séries instrumentales

Les données de température mensuelles homogénéisées utilisées proviennent de la base de données HISTALP (Auer *et al.*, 2008). Ces écarts à la moyenne 1960-1990 se présentent sous la forme de points de grille ($1^\circ \times 1^\circ$ lat x long). Ils sont interpolés à partir d'un réseau de 134 stations météorologiques et couvrent l'ensemble de l'arc alpin (43-49°N, 4-19°E, 0-3500m d'altitude) pour la période 1760-2009. Nous avons utilisé la dernière version de la base de données corrigée afin de prendre en compte le biais lié à la protection insuffisante des thermomètres avant 1850 (Böhm *et al.*, soumis). Pour calibrer et valider notre reconstruction, une série moyenne de températures estivales (JJA) a été calculée à partir de 16 points de grille (43-46°N, 5-8°E) situés dans les Alpes françaises. Au cours de la période 1760-2008, les corrélations moyennes entre ces séries prises deux à deux varient entre 0,85 et 0,99 ce qui révèle une homogénéité des températures dans la zone étudiée.

2 - Méthodologie

a - Standardisation des séries dendrochronologiques

Les basses et moyennes fréquences contenues dans les séries de largeur de cernes sont influencées par de nombreux facteurs non climatiques (Fritts, 1976). Des processus non stationnaires liés par exemple à la croissance annuelle de l'arbre doivent être retirés du signal dendrochronologique sans distorsion du signal climatique (Cook *et al.*, 1995). Plusieurs méthodes de standardisation qui ajustent le signal à une fonction mathématique ont été développées. Leur robustesse conduit le plus souvent à une perte de l'information de basses fréquences (Briffa *et al.*, 1992) et à une sous-estimation de la variabilité naturelle du climat (Helama *et al.*, 2004).

Au cours des dernières décennies, des méthodes plus flexibles permettant de mieux conserver la variabilité de basses fréquences ont été développées. La plus utilisée est la standardisation au moyen d'une courbe de croissance régionale (RCS, Briffa *et al.*, 1992). Cette courbe de croissance régionale (RC) est obtenue en alignant les séries en fonction de leur âge cambial. Les séries élémentaires de largeur de cernes sont ensuite transformées en indices (exprimés en pourcentages) correspondant, pour chaque année de croissance, au rapport des largeurs de cernes observées sur celles prédites par la courbe de tendance d'âge (Briffa *et al.*, 1992).

En milieu alpin, l'utilisation de la méthode RCS peut être biaisée en raison des différences importantes de croissance induites par le microclimat, la variation rapide des facteurs édaphiques ou les phénomènes de compétition. Dans cette étude, afin de mieux prendre en compte cet environnement hétérogène, RC est ajustée à chaque arbre en fonction de sa productivité juvénile au

moyen d'un réseau de neurones (Nicault *et al.*, 2010). La courbe de croissance adaptative (ARGC) obtenue permet également de s'affranchir des problèmes inhérents à des cernes manquants au niveau de la moelle (Nicault *et al.*, 2010).

b - Estimation des données manquantes

Les 34 chronologies standardisées couvrent la période 751-2008 mais leur durée est inégale. La matrice de données utilisée pour la reconstruction contient ainsi de nombreuses données manquantes. Ces données manquantes sont susceptibles d'introduire des biais dans la reconstruction, notamment une augmentation de la variance inversement proportionnelle au nombre de chronologies disponibles (Casty *et al.*, 2005). Afin de limiter ces biais, nous avons choisi d'estimer ces données manquantes au moyen de la méthode des analogues (Guiot *et al.*, 2005).

Cette méthode permet ainsi d'étendre l'ensemble des chronologies à la période 751-2008. A la différence des méthodes traditionnelles d'estimation de données, les analogues reposent sur la similarité entre les années et non sur la corrélation entre les chronologies (Rutherford *et al.*, 2005). Afin d'estimer une valeur ε_{ki} de la chronologie k au cours de l'année i : (1) les distances euclidiennes entre le vecteur annuel i et tous les autres vecteurs annuels pour lesquels nous disposons d'une valeur pour k sont mesurées ; (2) les 8 vecteurs les plus proches, appelés analogues de l'année i , sont retenus ; (3) un vecteur moyen (i') est calculé sur la base de ces 8 analogues ; (4) ε_{ki} est la valeur de k dans ce vecteur i' . Seuls les vecteurs ayant une distance à i inférieurs à 0,5 sont considérés comme analogues.

c - Reconstruction des températures estivales

La matrice de chronologies standardisées, complétées par la méthode des analogues, est traitée au moyen d'une analyse en composantes principales. L'objectif est de diminuer le nombre de régresseurs et les corrélations entre ces régresseurs afin d'obtenir des estimateurs robustes.

Une fonction de transfert entre les températures estivales 1760-2008 et les composantes principales est calculée au moyen d'un réseau de neurones artificiels. Afin de tester la validité de la reconstruction, une méthode bootstrap est utilisée (Guiot, 1990). La calibration de la fonction de transfert est réalisée sur un sous-échantillon extrait aléatoirement des données observées (données instrumentales et composantes principales). Le modèle est ensuite évalué sur les données restantes. Ce processus est itéré 1000 fois. Lors de chaque itération, deux coefficients de détermination (R^2C pour la période de calibration et R^2V pour celle de validation) sont calculés entre les données observées et les données reconstruites. L'intervalle de confiance de la reconstruction correspond au 5^e et 95^e centiles des 1000 reconstructions.

II - RÉSULTATS

1 - Caractéristique des chronologies de largeur de cernes standardisées

Afin de préserver au mieux la variabilité spatiale du réseau dendrochronologique, chaque population a été standardisée au moyen de la méthode ARGC. L'exemple de la chronologie d'Oriol (Figure 2a, b) montre que cette méthode permet de retirer la tendance d'âge tout en conservant au mieux les fluctuations de moyennes et basses fréquences contenues dans le signal dendrochronologique.

La matrice des chronologies standardisées est composée de 34 colonnes (chronologies) et de 1257 lignes (années) avec de nombreuses valeurs manquantes notamment avant 1500. Le pourcentage de valeurs manquantes varie entre 13 et 88% avec une moyenne de 66%. 11 chronologies sont disponibles avant 1500, 3 avant 1000. La méthode des analogues permet d'estimer la majorité des données manquantes. La Figure 2c est un exemple d'estimation des données manquantes pour la chronologie d'Oriol. Les coefficients de corrélation entre les données estimées et les données mesurées varient entre 0,77 et 0,99. Ils confirment la qualité des analogues. Les chronologies moyennes calculées à partir des matrices originales (Figure 3a) et complétée (Figure 3b) sont étroitement corrélées tant sur les hautes que sur les basses fréquences ($r=0,87$ sans filtrage, $r=0,90$ après lissage au moyen d'un filtre passe-bas de période 10 ans).

Les corrélations mobiles entre paires de chronologies ont été calculées sur des périodes de 100 ans puis moyennées. Les valeurs obtenues pour la matrice origi-

nale et la matrice complétée sont proches (Figure 3c). L'estimation de données au moyen des analogues ne modifie donc pas la corrélation moyenne entre les chronologies. Autrement dit, les analogues permettent de conserver la variabilité spatiale du jeu de données (Corona *et al.*, 2009).

2 - Robustesse de la reconstruction

La fonction de transfert a été établie entre les composantes principales issues de l'ACP réalisée sur la matrice complétée et la série moyenne de températures estivales (JJA, 1760-2008) issue de la base de données HISTALP. Le choix des prédictants repose sur plusieurs fonctions de réponse statiques et mobiles (non présentées ici). Elles démontrent que les températures estivales (JJA) expliquent en plus de 50% de la croissance du cerne du mélèze au niveau de la limite supraforestière.

Le réseau de neurones artificiels est configuré avec 4 neurones, et 1000 tirages bootstrap sont réalisés. Les statistiques de calibration (R_2C) et de vérification (R_2V) sont obtenues lorsque 14 composantes principales sont utilisées comme régresseurs. Elles atteignent respectivement 0,85 et 0,45. Ces coefficients très significatifs confirment la fiabilité du modèle capable de reconstruire 45% de la variance contenue dans la série instrumentale. L'écart moyen entre les températures moyennes et les températures reconstruites est de $-0,3^\circ\text{C}$ sur la période 1760-2008 (Figure 4a). Cet écart est maximal en 1896 ($+1,5^\circ\text{C}$) et 2003 ($-2,85^\circ\text{C}$).

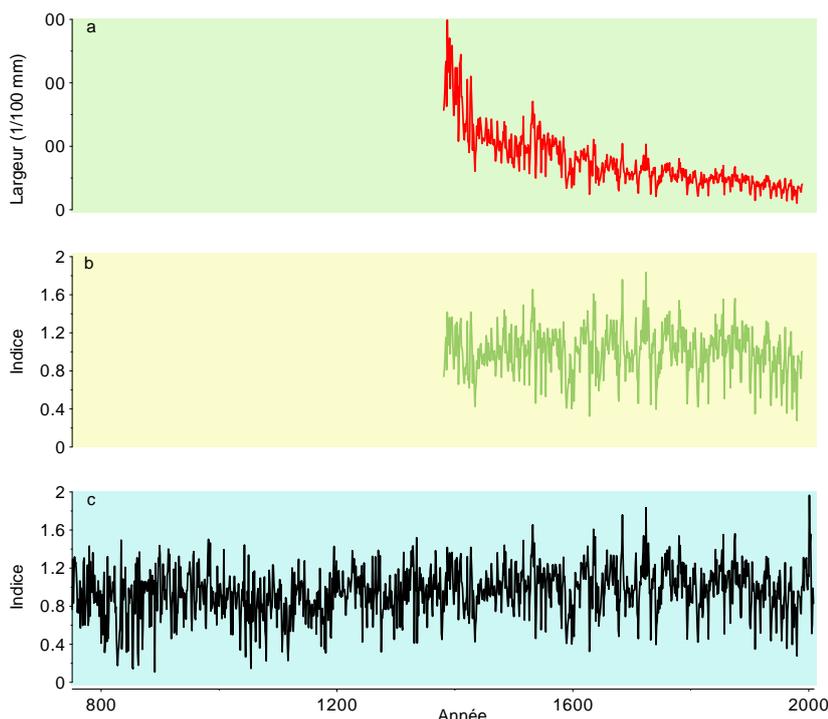


Figure 2 - Standardisation de la chronologie d'Oriol (1381-1989) au moyen de la courbe de croissance adaptative.
 a) Chronologie brute.
 b) Chronologie standardisée.
 c) Chronologie standardisée complétée au moyen de la méthode des analogues (751-2008).

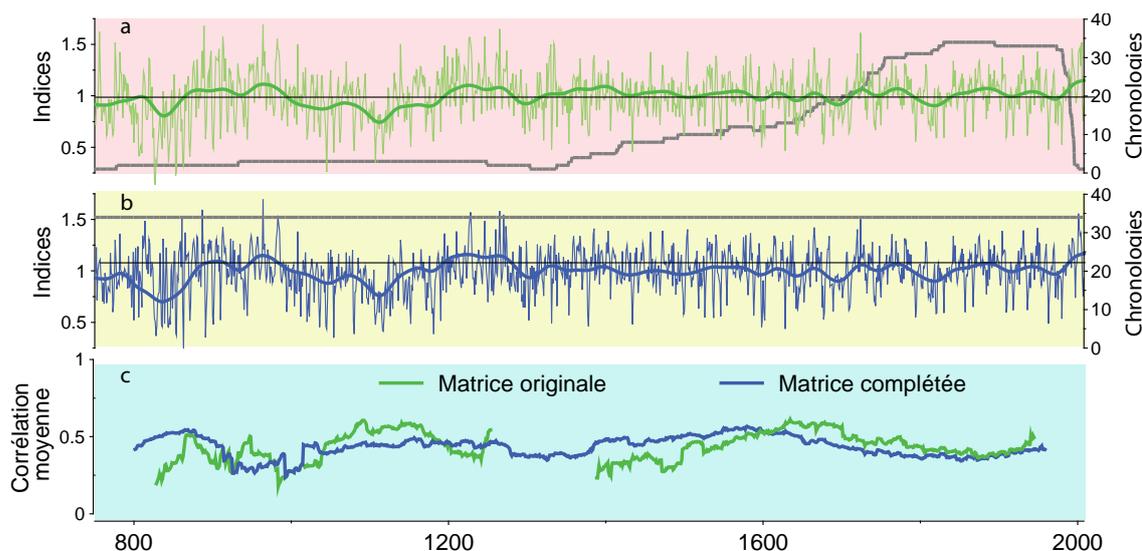


Figure 3 - Chronologies moyennes de largeur de cernes calculées à partir de matrice originale (a), de la matrice complétée au moyen de la méthode des analogues (b) et évolution de la corrélation moyenne entre chronologies calculée sur des intervalles mobiles de 100 ans (c). Les traits fins représentent les variations interannuelles de largeur de cernes, les traits épais le filtrage au moyen d'un filtre passe-bas de période 20 ans.

Lorsque les courbes sont lissées au moyen d'un filtre passe-bas de période 20 ans (Figure 4b), les températures reconstruites sont inférieures aux températures estimées avant 1860 ($-0,53^{\circ}\text{C}$) et entre 1975 et 2008 ($-0,7^{\circ}\text{C}$).

La reconstruction couvre la période 751-2008 avec une moyenne inférieure de $0,86^{\circ}\text{C}$ par rapport à la période de référence 1961-1990 (Figure 5a). L'erreur moyenne est estimée à $\pm 0,63^{\circ}\text{C}$. Les étés les plus froids sont ceux de 1816, 843 (-3°C) et 1179 ($-2,5^{\circ}\text{C}$) ; les plus chauds sont ceux de 2001 et 815 ($+3^{\circ}\text{C}$). Entre 1986 et 2008, les écarts à la moyenne 1961-1990 excè-

dent 8 fois $+1,2^{\circ}\text{C}$ en 1986, 1994, 1995, 1999, 2000, 2001, 2003 et 2004. Cette succession d'étés chauds est remarquable à l'échelle du dernier millénaire.

Après filtrage au moyen d'un filtre passe-bas de période 20 ans, la reconstruction met en évidence un optimum médiéval qui se poursuit jusqu'au début du XVI^e siècle. Des températures comparables à celles du XX^e siècle sont reconstruites au cours des décennies 800-820, 880-900, 960-980, et entre le début du XIII^e et la fin du XV^e siècle. Cet optimum est caractérisé par des fluctuations pluri-décennales importantes. Des étés frais sont reconstruits au cours des décennies 840-860,

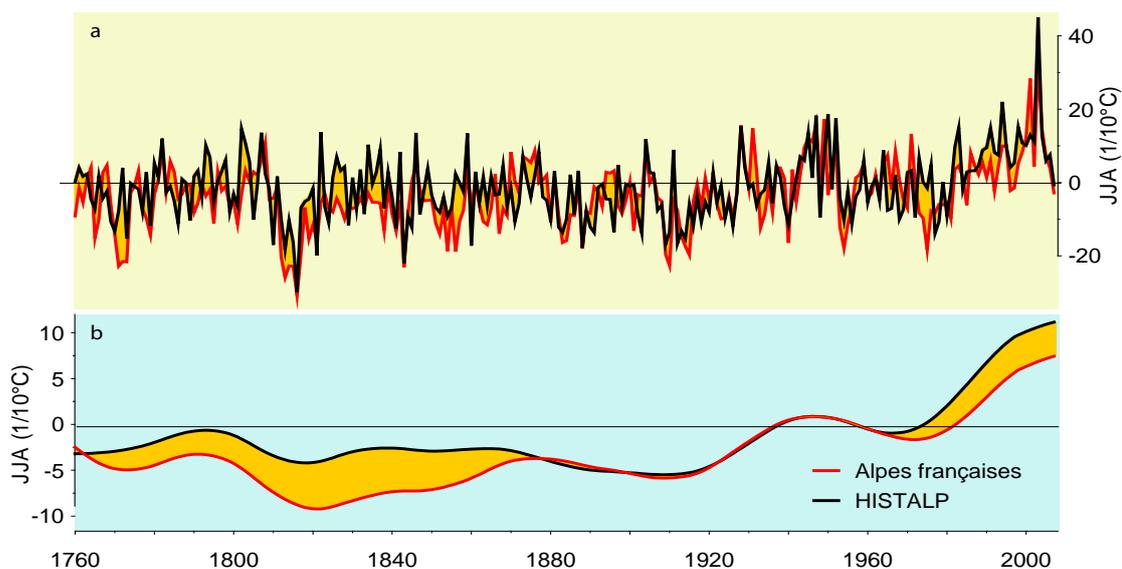


Figure 4 - Ecart (en jaune) entre la reconstruction (en rouge) et les données instrumentales (en noir). a) Variations interannuelles ; b) Fluctuations décennales obtenues après lissage au moyen d'un filtre passe-bas de période 20 ans. Les températures estivales (JJA) sont exprimées en $1/10^{\circ}\text{C}$ et représentent des anomalies par rapport à la moyenne 1961-1990.

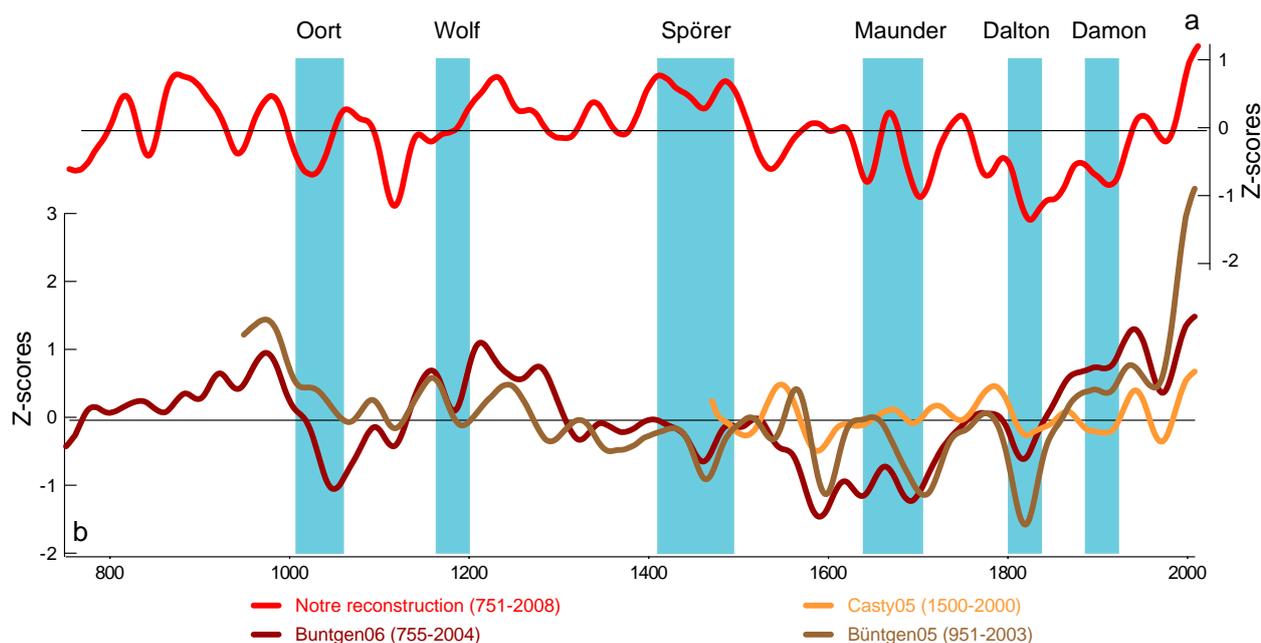


Figure 5 - Comparaison de notre reconstruction (a) avec les autres reconstructions alpines pluricentennaires (Büntgen *et al.*, 2005, 2006 ; Casty *et al.*, 2005). Afin de permettre la comparaison, toutes les données ont été transformées en z-scores (distance à la moyenne mesurée en unités d'écart-type) en se basant sur la période commune aux quatre chronologies (1500-2000).

940-960, 1000-1020 et 1100-1120. Entre le début du XVI^e et le début du XIX^e siècle, le PAG se caractérise par des températures inférieures à la moyenne 1961-1990 (-0,7°C). Des étés particulièrement frais sont

reconstruits au cours des décennies 1635-1645, 1695-1705 et 1810-1820 (-1,8°C). Depuis 1820, les températures augmentent de manière discontinue et avec deux décennies froides centrées sur 1910 et 1970.

III - DISCUSSION

1 - Comparaison de la reconstruction avec les données instrumentales

Les températures reconstruites sont systématiquement inférieures aux données instrumentales avant 1840. Frank *et al.* (2007) suggèrent que cette divergence constatée dans plusieurs reconstructions alpines (Casty *et al.*, 2005 ; Büntgen *et al.*, 2005, 2006 par exemple) peut être liée à l'utilisation de données identiques dans différentes reconstructions, à la méthode de standardisation ou à l'homogénéité des données instrumentales. Dans cette étude, nous avons utilisé un réseau de chronologies jamais utilisé précédemment. Les chronologies ont été standardisées au moyen de la méthode ARGC qui réduit les biais inhérents à l'utilisation de la méthode RCS (Nicault *et al.*, 2010). La calibration a été réalisée avec la dernière version de la base de données HISTALP corrigée pour limiter les biais liés à la protection insuffisante des thermomètres avant 1850. Malgré ces précautions, les écarts restent importants et l'hypothèse d'une divergence d'origine écophysologique est plausible. Les écarts constatés entre 1760 et 1850 résulteraient alors de relations

cernes/climat différentes à la fin du PAG (d'Arrigo *et al.*, 2008).

2 - Comparaison de la reconstruction avec les données historiques

Afin d'évaluer la qualité de notre reconstruction sur les hautes fréquences, les étés reconnus comme très froids (36) ou particulièrement chauds (23) dans les Alpes ont été extraits de diverses sources bibliographiques (Pfister, 1980 ; Le Roy Ladurie, 1967, 2007 ; Luterbacher *et al.*, 2004; Casty *et al.*, 2005). La comparaison avec notre reconstruction montre que 85% des années froides et seulement 55% des années chaudes citées dans la littérature sont reconstruites.

La formation de cernes étroits lors de pullulations de tordeuse du mélèze (*Zeiraphera diniana* Guénéé) explique une partie des divergences constatées pour les étés chauds. Ainsi, les étés de 1676, 1685 et 1811 recensés chauds dans la littérature sont également caractérisés par des épidémies de tordeuse dans les Alpes (Rolland *et al.*, 2001 ; Esper *et al.*, 2007). Pour cette raison, ils

sont caractérisés par des anomalies négatives dans notre reconstruction (respectivement $-1,8^{\circ}\text{C}$, $-2,2^{\circ}\text{C}$ et $-1,1^{\circ}\text{C}$).

De la même manière des années citées comme chaudes et sèches dans la littérature telles que 1420 (Le Roy Ladurie, 2007), 1523 (Wilson *et al.*, 2005), 1603 (Casty *et al.*, 2005), 1686 (Wilson *et al.*, 2005) ou 1781 (Casty *et al.*, 2005) apparaissent plutôt fraîches dans notre reconstruction. Cette divergence s'explique par la formation de cernes étroits liés à la sensibilité des populations méridionales à la sécheresse.

3 - Comparaison avec les reconstructions alpines

Afin d'évaluer la variabilité climatique alpine au cours du dernier millénaire, notre reconstruction est comparée aux reconstructions de Casty *et al.*, 2005 (Casty05), de Büntgen *et al.*, 2005 (Büntgen05) et de Büntgen *et al.*, 2006 (Büntgen06). Les coefficients de corrélation (1500-2000), après lissage des chronologies au moyen d'un filtre passe-bas de période de 20 ans, atteignent respectivement 0,32, 0,44 et 0,39. Ils sont tous significatifs à $p < 0,05$.

Büntgen06 est caractérisée, durant les IX^e et X^e siècles par l'existence d'un optimum climatique médiéval. Cet optimum n'est pas observé dans les Alpes françaises et des fluctuations décennales significatives avec des périodes froides centrées sur 840, 950, 1020 et 1120 sont reconstruites. Ces incertitudes sont probablement liées à la faible réplique des séries dendrochronologiques au cours de cette période. Il est intéressant de noter que ces décennies d'étés frais sont synchrones

avec les avancées glaciaires des glaciers du Görner et de Grindewald au milieu du IX^e siècle et avec le maximum glaciaire des glaciers du Görner et d'Aletsch au début du XII^e siècle (Holzhauser *et al.*, 2005). Elles coïncident également avec des hauts niveaux lacustres dans le Jura et dans les Préalpes (Holzhauser *et al.*, 2005).

Le XIII^e siècle est caractérisé par des températures élevées dans l'ensemble des trois reconstructions en accord avec les données historiques (Le Roy Ladurie, 2007). En revanche, le refroidissement rapide du début du XIV^e siècle décrit comme les prémices du PAG (Büntgen *et al.* 2005, 2006) dans les Alpes centrales est absent de notre reconstruction. L'optimum climatique médiéval se prolonge pendant près de 180 ans. Les températures estivales restent élevées au cours du XV^e siècle et, dans une moindre mesure, du XVI^e siècle. Les températures élevées du XV^e siècle concordent avec le retrait des glaciers suisses (Holzhauser *et al.*, 2005) et avec la précocité des dates de vendanges en Bourgogne en particulier entre 1420 et 1441 puis au cours des décennies 1470-1490 (Le Roy Ladurie, 2007). La douceur de la fin du XVI^e siècle semble par contre spécifique des Alpes occidentales françaises et plus généralement de l'Europe méridionale. Elle est également reconstruite dans les Pyrénées (Büntgen *et al.*, 2008) et sur toute l'aire méditerranéenne occidentale (Nicault *et al.*, 2008).

A partir de 1650, notre reconstruction est en phase avec les autres reconstructions alpines notamment lors des minima solaires de Maunder (1645-1715), Dalton (1800-1820) et Damon (1880-1920). Ce synchronisme confirme l'extension spatiale des trois périodes les plus froides du PAG dans tout l'arc alpin (Luterbacher *et al.*, 2001).

CONCLUSION

Notre étude présente la première reconstruction des températures estivales couvrant le dernier millénaire pour les Alpes françaises. Les statistiques de calibration et de validation calculées entre les données instrumentales et les données reconstruites prouvent la validité de la reconstruction et confirment le potentiel des mélèzes pluricentennaires et des bois de construction. Sur le plan spatial, cette reconstruction comble une lacune entre les reconstructions des Alpes internes (Büntgen *et al.* 2005, 2006) et celles existant

dans le milieu méditerranéen (Nicault *et al.*, 2008, par exemple). Sur le plan temporel, elle permet de cerner la spécificité des Alpes françaises du Sud : un optimum médiéval caractérisé par des fluctuations pluridécennales importantes et un Petit Age Glaciaire tardif particulièrement doux durant les XV^e et XVI^e siècles. Elle démontre enfin l'existence d'un signal climatique commun à la majorité des populations malgré liées à l'histoire des peuplements et à leur réactivité différente à l'égard du climat.

BIBLIOGRAPHIE

AUER I., BOHM R., JURKOVIC A., LIPA W., ORLIK A., POTZMANN R., SCHONER W., UNGERSBOCK M., MATULLA C., BRIFFA K.R., 2007. HISTALP-historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, *International Journal of Climatology*, 27, 1, 17-46.

BÖHM R., JONES P. D., HIEBL J., FRANK D., BRUNETTI M., MAUGERI M. soumis. The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760-2007. *Climatic change*.

- BRIFFA K.R., JONES P.D., BARTHOLIN T.S., ECKSTEIN D., SCHWEINGRUBER H.F., KARLEN W., ZETTERBERG P., ERONEN M., 1992. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales. *Climate Dynamics* 7, 111–119.
- BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D.C., NICOLUSSI K., SCHMIDHALTER M., 2005. A 1052-year tree-ring proxy of Alpine summer temperatures. *Climate Dynamics*, 25, 141–153.
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., NIEVERGELT D., ESPER J., 2006. Summer temperature variations in the European Alps, AD 755–2004, *Journal of Climate*, 19, 5606–5623.
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., GRUDD H., ESPER J., 2008. Long-term summer temperature variations in the Pyrenees. *Climate dynamics*, DOI 10.1007/s00382-008-0390-x
- CASTY C., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER, J., BÖHM, R., 2005. Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology* 25, 1855–1880.
- COOK E.R., BRIFFA K.R., MEKO D.M., GRAYBILL D.A., FUNKHOUSER G., 1995. The ‘segment length curse’ in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies. *The Holocene* 5, 229–237.
- CORONA C., GUIOT J., EDOUARD J.L., CHALIÉ F., BÜNTGEN U., NOLA P., URBINATI, C., 2009. Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Climate of the Past*, accepted.
- D’ARRIGO R., WILSON B., LIEPERT B., CHERUBINI P., 2008. On the ‘divergence problem’ in Northern forest : a review of the tree-ring évidence and possible causes. *Global and Planetary change*, 60, 289-305.
- EDOUARD J.L., THOMAS A., 2008. Cernes d’arbres et chronologie holocène dans les Alpes françaises. Actes de la Table ronde JurAlp « Dynamique holocène de l’environnement dans le Jura et les Alpes : du climat à l’Homme » dir. M. Desmet, M. Magny, F. Mocchi, Aix en Provence, 15-16 novembre 2007, Collection Edytem, Cahiers de Géographie, 6, 179-190.
- ESPER F., BÜNTGEN U., FRANK D.C., NIEVERGELT D., LIEBHOLD A., 2007. 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B* 274, 671-679.
- FRANK D., ESPER J., 2005. Temperature reconstructions and comparisons with instrumental data from a tree-ring network for the European Alps. *International Journal of Climatology* 25, 1437-1454.
- FRANK D., BÜNTGEN U., BÖHM R., MAUGERI M., ESPER J., 2007. Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quaternary Science Review* 28, 3298-3310.
- FRITTS H. C., 1976. Tree-rings and climate. Academic Press, London, 567 p.
- GUIOT J., 1990. Methods of calibration, verification and reconstruction, in: Methods of denrochronology, application in the environmental sciences edited by: COOK E. and KAIRIUKSTIS L., Dordrecht, International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academy Publications, 163-217.
- GUIOT J., NICAULT A., RATHGEBER C., EDOUARD J.L., GUIBAL F., PICHARD G., TILL, C., 2005. Last-millennium summer-temperature variations in Western Europe based on proxy data. *The Holocene* 15, 1-12.
- HELAMA S., LINDHOLM M., TIMONEN M., ERONEN. M. 2004. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods. *Theoretical and Applied Climatology* 79, 239-254
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBÜHL H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene* 15, 789-801.
- JANSEN E., OVERPECK J., BRIFFA K.R., DUPLESSY J.C., JOOS F., MASSON-DELMOTTE V., OLAGO D., OTTO BLIESNER B., PELTIER W.R., RAHMSTORF S., RAMESH D., RAYNAUD D., RIND D., SOLOMINA O., VILLALBA R., ZHANG D. 2007: Palaeoclimate. In: SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis* Contribution of Working Group I to the Fourth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- LAMB H.H., 1976. Climate: present, past and future, London: Methuen, 1976.
- LE ROY LADURIE, E., 1967. Histoire du climat depuis l’an mil. Flammarion, Paris.
- LE ROY LADURIE, E., 2007. Abrégé d’histoire du climat – Du Moyen-Age à nos jours. Fayard, Paris.
- LUTERBACHER J., RICKLI R., XOPLAKI E., TINGUELY C., BECK C., PEISTER C., WANNER H., 2001. The Late Maunder Minimum (1675–1715) - a key period for studying climatic variability and decadal scale climate change in Europe. *Climate Change*, 49, 441-462.
- LUTERBACHER J., DIETRICH D., XOPLAKI E., GROSJEAN M., WANNER H., 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science* 303, 1499-1503.
- NICAULT A., ALLEAUME S., CARRER M., NOLA P., , 2008. Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Climate dynamics*, 31, 227-245.
- NICAULT A., GUIOT, J. BREWER S., EDOUARD J.L., 2010. Preserving long-term climatic changes in standardisation of tree-ring series by Adaptive Regional Growth Curve (ARGC). *Dendrochronologia*, 28-1, 1-12.
- PEISTER C., 1980. The Little Ice Age: Thermal and Wetness Indices for Central Europe. *Journal of Interdisciplinary History* 10, 665-696.
- ROLLAND C., BALTENSWEILER W., PETITCOLAS V., 2001. The potential of using Larix decidua ring widths in reconstructions of larch budmoth (*Zeiraphera diniana*) outbreak history: dendrochronological estimates compared with insect surveys. *Trees* 15, 414-426.
- RUTHERFORD S., MANN M.E., OSBORN T.J., BRADLEY R.S., BRIFFA K.R., HUGHES M.K., JONES P.D., 2005. Proxy-based Northern Hemisphere surface temperature reconstructions: sensitivity to method, predictor network, target season and target domain. *Journal of Climate* 18, 2308-2329.
- WILSON R.J.S., LUCKMAN B.H., ESPER J., 2005. A 500 year dendroclimatic reconstruction of spring-summer precipitation from the lower Bavarian Forest region, Germany. *International Journal of Climatology* 25, 611-630.

ÉTUDE DE LA RELATION ENTRE LA CROISSANCE DU PIN CEMBRO ET LE CLIMAT DANS LES ALPES FRANÇAISES DEPUIS 500 ANS

*CLIMATE/GROWTH RELATIONSHIPS IN PINUS CEMBRA IN THE SOUTHERN FRENCH ALPS
OVER THE LAST 500 YEARS*

MÉLANIE SAULNIER¹, JEAN-LOUIS EDOUARD², CHRISTOPHE CORONA¹, FRÉDÉRIC GUIBAL¹

¹IMEP, UMR 6116 CNRS / Aix-Marseille Université, Bâtiment Villemin,
Europole de l'Arbois, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

²Centre Camille Julian, UMR 6573 CNRS, MMSH, 5 Rue du château de l'Horloge, F 13094 Aix-en-Provence cedex 2.

Contact : melanie.saulnier@etu.univ-cezanne.fr

RÉSUMÉ

Les relations entre la croissance radiale du Pin cembro et le climat ont été étudiées sur 42 populations réparties le long d'un gradient latitudinal dans les Alpes françaises. Les deux méthodes complémentaires utilisées dans cette étude (années caractéristiques et fonctions de réponse) portent sur les variations de croissance de haute et de très haute fréquence. Les données climatiques intégrées se composent d'archives historiques et des données de la base HISTALP. Les résultats mettent en évidence une relation positive de la croissance radiale avec les températures estivales et les précipitations hivernales. L'étude révèle aussi l'importance du gradient latitudinal dans la variation spatiale de la réponse des arbres au climat. Les populations les plus septentrionales apparaissent plus thermo-dépendantes tandis que les populations méridionales seraient plus pluvio-dépendantes. Cette différence s'explique probablement par l'action de masses d'air océaniques, continentales et méditerranéennes. De plus, une tendance à l'homogénéisation spatiale de la relation cerne-climat apparaît depuis la fin du XIX^e siècle. Enfin, la complexité de la relation entre la croissance radiale du Pin cembro et le climat, révélée par cette étude, remet en question l'utilisation de cette espèce dans les reconstructions et modélisations climatiques.

MOTS-CLÉS : DENDROCHRONOLOGIE, ALPES FRANÇAISES, PINUS CEMBRA, ANNÉES CARACTÉRISTIQUES, FONCTION DE RÉPONSE, RELATION CERNE-CLIMAT.

ABSTRACT

Climate / growth relationships in Pinus cembra were studied in 42 populations following the latitudinal gradient in the French Alps. Both complementary methods used in this study, pointer years and response functions, focus on high and very high frequency variations. Climatic data are issued from historical archives and HISTALP dataset. Results evidenced a positive relationship of radial growth with summer temperature and winter precipitation. The study showed the importance of latitudinal gradient throughout the French Alps. Northern populations seem to be more thermo-dependant, while southern populations seem more pluvio-dependant. Various climatic influences explain probably this difference. Moreover, a spatial homogenisation appeared since the end of 19th century. Last, the high complexity of the climate / growth relationships evidenced in this study raises questions about pertinence of use this species in climatic reconstructions and model.

KEYWORDS: DENDROCHRONOLOGY, FRENCH ALPS, PINUS CEMBRA, POINTER YEARS, RESPONSE FUCTIONS, CLIMATE- GROWTH RELATIONSHIPS.

INTRODUCTION

Dans le contexte des changements climatiques actuels (IPCC, 2007), connaître les relations entre le climat et la croissance des arbres est primordial pour comprendre l'évolution des écosystèmes forestiers et élaborer des modèles de croissance et des modèles climatiques. Cette étude vise à identifier les relations cerne-climat chez le Pin cembro dans les Alpes françaises. Les relations entre la croissance radiale du Pin cembro et le climat ont été fréquemment étudiées à travers l'arc alpin à la fois sur un réseau de chronologies étendu (Carrer *et al.*, 2007) et des réseaux plus localisés en particulier dans les Alpes suisses, italiennes et

autrichiennes (Carrer et Urbinati, 2004 ; Motta et Nola, 1996 ; Oberhuber, 2004). En revanche, l'étude de ces relations dans les Alpes françaises s'est focalisée sur un réseau bien plus modeste (Petitcolas et Rolland, 1998). Cette étude présente donc l'originalité de s'appuyer sur un réseau dense composée de 42 populations réparties dans les Alpes françaises soumises à des influences climatiques océaniques, continentales et méditerranéennes, et de faire appel à deux approches, dont la combinaison est originale, pour établir les relations climat-croissance : les fonctions de réponse et les années caractéristiques.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1 - Les données dendrologiques et l'analyse dendrochronologique

L'étude s'applique aux données dendrochronologiques de 42 populations des Alpes françaises composées de 652 individus couvrant la période 1313-2003.

Les populations ont été choisies pour intégrer au mieux les gradients Est-Ouest (5°90' E - 7°45' E) mais aussi Nord-Sud, encore assez mal connu (44° 06' N - 45°53' N) (Figure 1). Les populations échantillonnées sont localisées à haute altitude, dans l'étage subalpin, à proximité de la limite supérieure de la forêt (1935-2350 m) dans des peuplements ouverts soumis à différentes expositions et à une faible perturbation humaine (Figure 2).

Sur chaque site, au moins deux carottes ont été prélevées sur des arbres dominants ou co-dominants à l'aide d'une tarière de Pressler. Le nombre d'arbres varie de 8 à 29 selon les sites. Les séries de cernes ont été mesurées au 0,01 mm (Linntab Rinntech®) et interdatées à l'aide du programme TSAPwin®. Les chronologies ont ensuite fait l'objet de standardisations différentes suivant l'approche utilisée (cf *infra*).

Plusieurs variables statistiques dont la sensibilité moyenne (MS), le signal exprimé par les populations (EPS) et la corrélation moyenne entre les arbres (r) ont été calculées (résultats non présentés dans cette étude) pour les chronologies de site afin de vérifier l'interdatation et la robustesse du signal climatique porté par chacune.

2 - Les données climatiques

Deux types de données climatiques ont été utilisés : les relevés instrumentaux des températures et de précipitations du réseau HISTALP pour la période 1800-2000 et des données archivistiques et historiques couvrant les 500 dernières années.

a - Les données HISTALP

La base de données HISTALP s'appuie sur un réseau de stations dont 192 ont livré des températures et 132 ont délivré des précipitations. Les données sont interpolées selon une maille carrée de résolution de 0,1 x 0,1° pour les précipitations et 1 x 1° pour les températures (Auer *et al.*, 2007; Böhm *et al.*, 2008). L'étude de la relation cerne-climat a été réalisée à partir du point de grille le plus proche de la population considérée.

b - Les données historiques

Afin d'étendre l'étude des relations entre le climat et la croissance radiale du Pin cembro sur une période de 500 ans, une recherche sur les données historiques disponibles sur le climat des Alpes a été effectuée. Les données utilisées sont essentiellement basées sur les dates de vendanges annuellement recensées depuis plusieurs décennies. Les indices climatiques de Van Engelen et Pfister (températures et précipitations) basés sur une compilation de données de récoltes, ont aussi été utilisés. Enfin d'autres données (Leroy-Ladurie, 2004, 2006) résumant les conditions de vie, notamment les conditions climatiques, en France se sont révélées précieuses pour comprendre certains extrêmes climatiques enregistrés dans les séries dendrochronologiques.

3 - Relation cerne-climat

a - Les Analyses en Composantes Principales

Plusieurs études sur la réponse au climat du Pin cembro dans les Alpes ont révélé l'existence d'un gradient longitudinal (Carrer et Urbinati, 2004 ; Oberhuber, 2004) rendant les populations sensibles

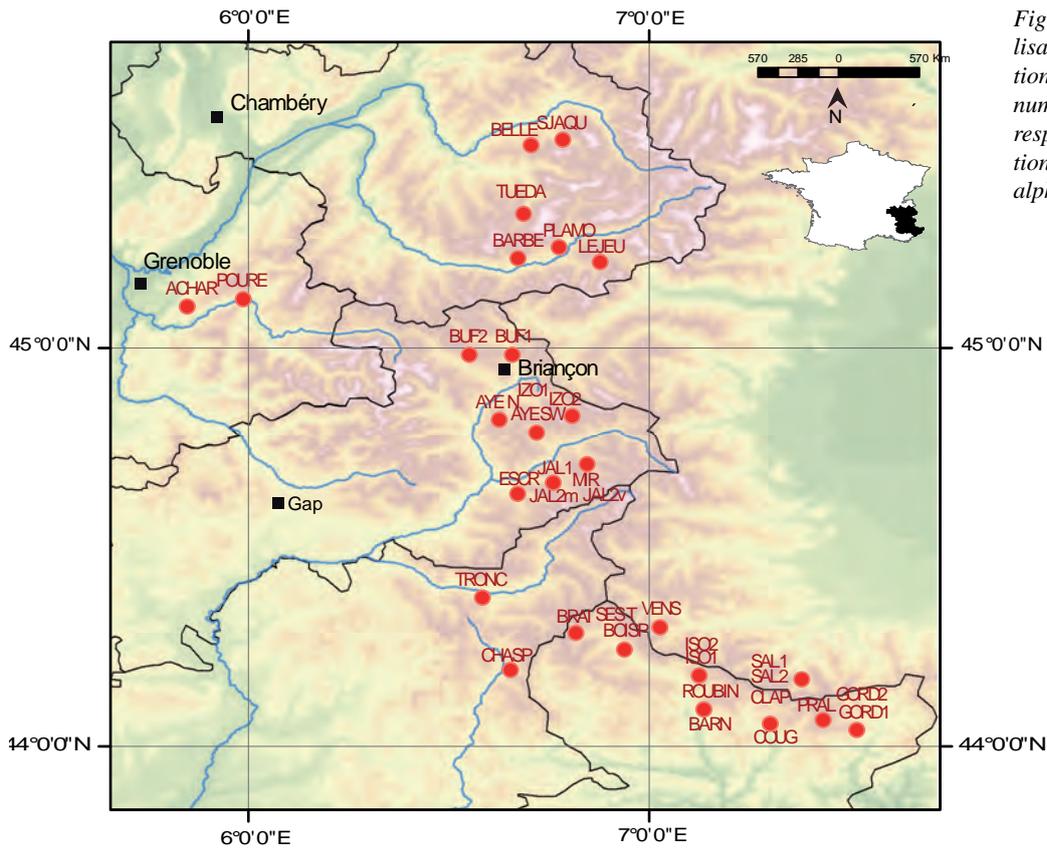


Figure 1 - Carte de localisation des 42 populations de Pin cembro (les numéros indiqués correspondent aux populations classées par ordre alphabétique).



Figure 2 - Forêt de Pin cembro en limite altitudinale (Lac Miroir, commune de Ceillac, Hautes-Alpes).
Photo B. Talon, Juillet 2009.

à des paramètres climatiques différents. Afin d'étudier l'influence éventuelle du gradient latitudinal sur la relation des arbres aux paramètres climatiques mensuels, les chronologies standardisées des populations ont été analysées de manière à extraire un signal commun enregistré au pas de temps annuel. Pour cela notre choix méthodologique s'est porté sur les analyses en composantes principales sur les matrices des chronologies standardisées (colonnes = populations ; lignes = années) qui permettent d'étudier les similitudes dans la variabilité interannuelle de la croissance radiale (Jolliffe, 2002). Une classification a ensuite été réalisée au moyen de la méthode des *k-means* (Carrer *et al.* 2007). Deux ACP ont été réalisées sur les deux matrices de chronologies ayant été différemment standardisées sur la période commune à toutes les populations (1903-1993). Les groupes déterminés au moyen des *k-means* ont permis de calculer des chronologies régionales en moyennant les chronologies standardisées. Ces chronologies régionales ont ensuite fait l'objet de l'analyse des relations cerne-climat.

b - Les années caractéristiques

Les années caractéristiques sont identifiées à partir des chronologies moyennes des populations standardisées pour obtenir l'indice normalisé C de Cropper (1979). La méthode consiste à calculer le rapport de la valeur de largeur de cerne d'une année à la moyenne des largeurs mesurées sur une fenêtre de 13 années centrées sur l'année considérée. Les valeurs obtenues sont normalisées et rangées en 3 classes de déviation de croissance positive ou négative : faible ($C > 1$), forte ($C > 1,28$) et extrême ($C > 1,645$).

Les années caractéristiques sont utilisées pour mettre en évidence les effets de changements abrupts des conditions environnementales, en particulier les facteurs climatiques (Petitcolas et Rolland, 1998 ; Neuwirth *et al.*, 2007). Les résultats et leurs interprétations portent sur les années à croissance négative plus liées à l'action d'un facteur limitant que les années à croissance positive.

c - Les fonctions de réponse

La fonction de réponse est une régression linéaire orthogonalisée (Fritts, 1976) dans laquelle les variables explicatives sont les données climatiques et les variables dépendantes sont les largeurs de cernes. Les données climatiques utilisées sont les 16 variables mensuelles de températures et de précipitations de Juin de l'année t-1 à Septembre de l'année t, correspondant à l'année biologique de l'espèce à cette altitude et étendues à l'été précédent, dont les conditions climatiques peuvent influencer sur la croissance de l'année t.

Afin de faire ressortir les variations interannuelles du signal dendrochronologique, les séries individuelles ont été standardisées par le logiciel ARSTAN (Cook et Holmes, 1984). Les données brutes de largeur de cernes ont d'abord été corrigées par une fonction exponentielle négative rectifiant la tendance d'âge puis par une fonction spline cubique flexible (fenêtre 20 ans) qui force l'expression des variations interannuelles (en diminuant les auto-corrélations dans le signal filtré). Les séries individuelles, ainsi standardisées puis moyennées en chronologie de populations, sont triées en fonction des groupes issues de l'ACP (cf *supra*), sont moyennées en chronologies régionales et sont utilisées comme variables dépendantes lors du calcul des fonctions de réponse.

La robustesse des coefficients obtenus est testée par la méthode du « *bootstrap* » (Efron, 1979), qui consiste à répéter 1000 fois la régression. La valeur moyenne du coefficient obtenu est divisée par l'écart-type moyen et est considérée significative à 95% si elle est supérieure à $|1,96|$.

Le calcul des fonctions de réponse (RF) a été effectué sur une période débutant en 1800 jusqu'à la fin des chronologies variant selon les groupes. Afin de tester la stabilité et la cohérence de la fonction de réponse dans le temps, des fonctions de réponse mobiles (MRF), sur des intervalles de 100 ans décalés selon un pas de temps annuel, ont été calculées. Les RF et MRF ont été calculées à l'aide du logiciel DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul, 2004).

II - RÉSULTATS

1 - Les évènements extrêmes

a - Un gradient latitudinal mis en évidence au moyen de l'ACP

L'ACP réalisée sur les chronologies standardisées selon la méthode de Cropper montre que 16% de la variance est expliquée par l'axe 1 (PC1). La projection des populations sur PC1 révèle que les populations septentrionales contribuent positivement à cet axe alors que les populations méridionales sont situées sur la partie négative (Figure 3 b). Le coefficient de cor-

rélation élevé obtenu entre les coordonnées projetées sur PC1 et la latitude ($r^2=0,78$ soit $r=0,88$) confirme l'existence du gradient latitudinal. La classification réalisée au moyen des *k-means* permet d'individualiser deux groupes de populations (Nord et Sud) qui ressortent nettement lors de la spatialisation des coordonnées (Figure 3 a) avec :

- Gr 1 : les 25 populations les plus septentrionales (Moyenne-Tarentaise, Haute-Maurienne et Briançonnais-Queyras) ;
- Gr 2 : les 17 populations les plus méridionales (Mercantour).

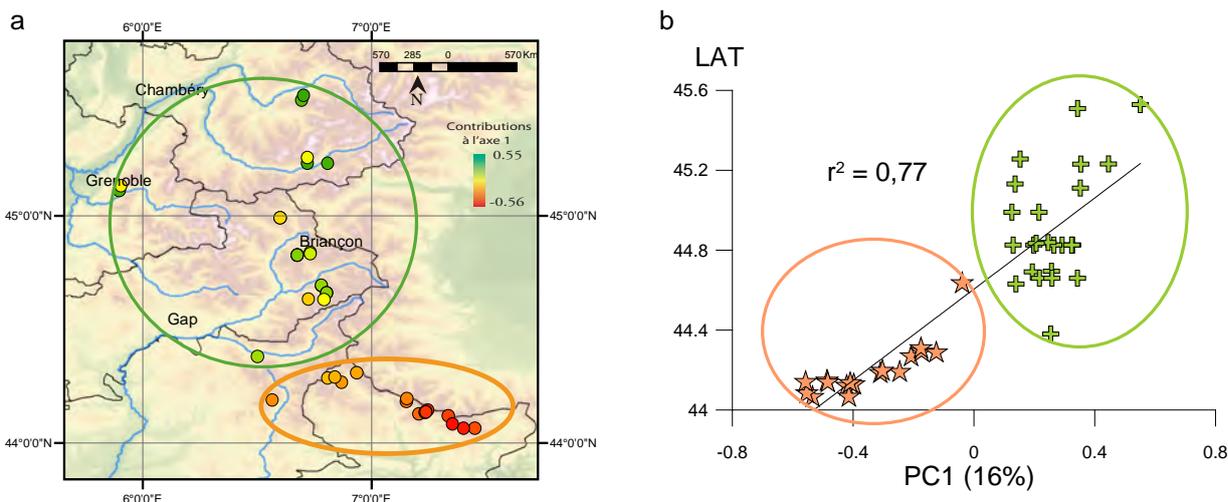


Figure 3 - a) Carte des populations et groupes basée sur les valeurs obtenues sur la 1^{ère} composante ;
b) Corrélation entre ces valeurs et la latitude.

b - Les années caractéristiques

Les chronologies indicées des 42 populations réunies au sein des deux groupes ont été analysées pour extraire les années caractéristiques correspondant aux années où au moins 25% des arbres ont formé un cerne extrêmement négatif.

Sur l'ensemble de la période considérée 27 années caractéristiques extrêmes sont communes aux deux groupes (Figure 4), 10 sont propres au Gr 1 et 12 au Gr 2.

Les années caractéristiques communes coïncident avec des conditions climatiques plus froides que la normale et/ou avec des conditions printanières particulièrement sèches, excepté au XVI^e siècle et durant la seconde moitié du XX^e siècle où les cernes minces correspondent à des années aux conditions xériques.

Dans les populations du Gr 2, les années caractéristiques coïncident avec des conditions climatiques extrêmement rigoureuses, en particulier hivernales et/ou sèches. Elles correspondent aussi souvent à des dates de vendanges précoces. Les années caractéristiques spécifiques aux populations du Gr 1 semblent résulter de conditions climatiques variées, coïncidant cependant avec des vendanges tardives résultant le plus souvent de l'occurrence d'au moins une saison froide entre le printemps et l'automne.

A partir du XIX^e siècle, une plus grande proportion d'années caractéristiques communes aux deux populations est mise en évidence contrairement à la période antérieure qui semble marquée par une plus forte hétérogénéité spatiale des années à croissance réduite.

Par ailleurs, sur les 24 éruptions volcaniques majeures de la période considérée, 9 coïncident avec une année caractéristique extrême et 17 coïncident avec une réduction de la croissance d'au moins 25% pour l'ensemble des populations (résultats non expo-

sés dans cette étude). A titre d'exemple, les années 1708-1709 ont été affectées par 4 éruptions, celle du Vésuve, du Santorin, du mont Fuji-Yama et du Piton de la Fournaise.

2 - Rôle du climat sur les fluctuations inter-annuelles de largeur de cernes

a - L'existence d'un gradient latitudinal

L'ACP réalisée sur les chronologies standardisées à l'aide du logiciel ARSTAN, montre que 16% de la variance est expliquée par PC1. Sur la carte (Figure 5 a) représentant les coordonnées des populations sur PC1, l'existence de trois groupes de populations apparaît nettement selon un gradient latitudinal. Le gradient est confirmé par la corrélation élevée entre les coordonnées des individus sur PC1 et la latitude ($r^2=0,77$ soit $r=0,88$, Figure 5 b). La classification au moyen des k-means permet d'identifier trois groupes:

- Gr 1 : les 8 populations les plus septentrionales (Moyenne-Tarentaise et Haute-Maurienne) ;
- Gr 2 : les 17 populations des Alpes internes (Briançonnais-Queyras) ;
- Gr 3 : les 13 populations les plus méridionales (Mercantour).

Ainsi, ces 38 populations (4 populations ayant été regroupées au sein d'une même population) ont été réunies en 3 groupes et les chronologies moyennes standardisées qui en ont résulté ont servi de variables dépendantes lors du calcul des fonctions de réponse.

b - Les fonctions de réponse fixes et mobiles

L'analyse des relations entre la croissance radiale du Pin cembro et le climat par les fonctions de réponse montre l'influence significative des conditions clima-

| SIECLES | COMMUNES | | | | | | | | GROUPE 1 | | | | | | GROUPE 2 | | | | | | | | | |
|-------------------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|-----|----------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---|
| | Années | CLIMAT | | | | | Ven | Eru | Années | CLIMAT | | | | | Ven | Années | CLIMAT | | | | | Ven | | |
| | | P | E | Au | H | An | | | | P | E | Au | H | An | | | P | E | Au | H | An | | | |
| 16 ^{ème} | 1536 | | Chaud | Chaud | | | P | X | 1577 | | | | | | Chaud | P | 1523 | | Froid | | | | | P |
| | 1538 | | | | Chaud | | | P | | | | | | | | | 1529 | | Humide | | | | | T |
| | 1563 | | | | | | | | | | | | | | | | 1573 | Froid | | Humide | | Chaud | Froid | T |
| | 1567 | Chaud | Chaud | Chaud | | | | P | | | | | | | | | 1589 | | Humide | | Chaud | Froid | | P |
| | 1588 | Chaud | Froid | Humide | | | | P | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 ^{ème} | 1628 | | Humide | | | Froid | | T | | Froid | | | Froid | Chaud | T | 1624 | | | | | Froid | | | P |
| | 1639 | | Froid | Froid | | Chaud | | | | | Chaud | Froid | Chaud | | | 1685 | | Froid | | | Chaud | | | P |
| | 1640 | Froid | | | | | P | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1675 | Froid | | | | | T | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 ^{ème} | 1709 | | | | Froid | | X | | 1735 | | | | | | T | 1714 | Froid | | | Chaud | Froid | | | T |
| | 1721 | Froid | | | | | T | X | 1750 | | | Chaud | | | T | 1731 | Froid | Chaud | | | Froid | | | T |
| | 1743 | Humide | | | | | T | | | | | | | | | 1783 | | | | | Humide | | | T |
| | 1767 | Froid | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 ^{ème} | 1813 | Chaud | Froid | Froid | Froid | Chaud | | T | X | 1820 | Chaud | | Froid | | Froid | T | 1868 | | Chaud | | Chaud | Chaud | | P |
| | 1830 | Chaud | | | | | | | 1886 | | | Chaud | Froid | | | 1882 | Froid | Humide | Chaud | | | | | P |
| | 1839 | Froid | Chaud | | | | | T | | 1891 | Froid | Froid | | Chaud | Froid | T | | | | | | | | |
| | 1840 | Chaud | Froid | Humide | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1862 | Chaud | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1884 | Chaud | | | | | | P | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 ^{ème} | 1896 | | Humide | Froid | Chaud | Froid | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1933 | | | | Chaud | | | | 1981 | | | | | | | 1919 | Froid | Chaud | | Humide | | | | |
| | 1940 | | Froid | Humide | Froid | Froid | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1948 | Chaud | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1957 | Chaud | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1975 | | | | Chaud | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1992 | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |

■ Froid ■ Chaud ■ Sec ■ Humide P : précocce T : tardive

Figure 4 - Tableau récapitulatifs des années caractéristiques, conditions climatiques (températures et précipitations), vendanges (Ven.) et éruptions volcaniques (Eru.). P et E correspondant aux conditions climatiques du printemps et de l'été de l'année t, Au et H à celles de l'automne et de l'hiver de l'année t-1.

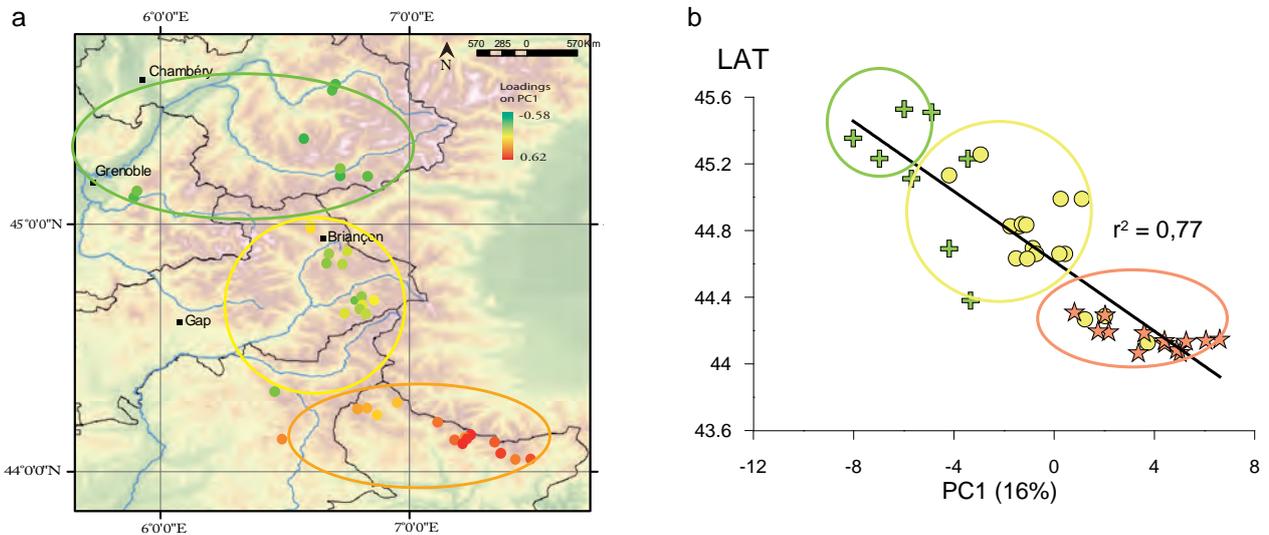


Figure 5 - a) Carte des populations et des groupes basée sur les valeurs obtenues sur la 1ère composante ; b) Corrélation entre ces valeurs et la latitude.

tiques d'août_{t-1} et des températures de mars_t quelle que soit la position géographique (Figure 6a). Des différences significatives dans la relation au climat apparaissent entre les 3 groupes. Ainsi, les croissances des populations des groupes 2 et 3 présentent des patrons de réaction au climat assez similaires. La croissance apparaît positivement corrélée aux températures estivales, juillet_t exerce une action significative dans les deux groupes tandis que juin_t et août_t exercent une action significative dans le groupe 2. La croissance est aussi positivement corrélée aux précipitations hivernales (décembre, janvier) dans les 2 groupes, à celles de mars_t (groupe 3) et novembre_{t-1} (groupe 2). La croissance du groupe 1 est positivement corrélée aux températures d'octobre_{t-1}, mai_t et août_t et aux précipitations de septembre_{t-1}.

Les MRF révèlent aussi des similitudes entre les différents groupes (Figure 6b). L'axe chronologique des abscisses débute à la fin du premier intervalle (1800-

1900) sur lequel la fonction de réponse mobile a été calculée. Une relation négative avec les températures de mars apparaît dès la fin du XIX^e s.

Les réponses des arbres au climat ont évolué significativement de façon différente du nord au sud. Les populations 2 et 3 présentent un patron évolutif assez similaire. Leurs MRF montrent une intensification de la relation positive avec les températures estivales (juin et juillet) et une relative stabilité de la relation positive aux précipitations hivernales (décembre et janvier). La relation négative avec les températures d'août_{t-1} apparaît à partir de la fin du XIX^e s. Au nord (groupe 1), cette relation se manifeste depuis la première moitié du XIX^e s. Par ailleurs, l'évolution de la relation au climat des populations du groupe 1 se caractérise par l'apparition d'une relation positive aux précipitations de décembre_{t-1} et aux températures de juillet_t dès la fin du XIX^e s.

III - DISCUSSION

1 - Apports complémentaires des deux approches à la compréhension de la relation cerne-climat chez le Pin cembro

L'analyse des relations cerne-climat chez le Pin cembro dans les Alpes françaises a mis en évidence l'importance des températures estivales et des précipitations hivernales, en accord avec d'autres études (Carrer *et al.*, 2007 ; Oberhuber *et al.*, 2008). Les années caractéristiques – cernes minces – apparaissent liées à des conditions climatiques plus froides que la normale, ce caractère pouvant affecter soit l'année dans son ensemble, soit une saison en particulier. L'étude a également révélé une répartition spatiale des relations cerne-climat suivant un gradient latitudinal.

Les populations les plus septentrionales présentent une thermo-dépendance élevée. La relation positive aux températures de mai est vraisemblablement liée à la chaleur nécessaire à la réactivation cambiale. Ces populations répondent fortement à l'occurrence d'une saison froide par une croissance fortement réduite.

Les populations méridionales apparaissent pluvio-dépendantes, comme l'atteste une relation significativement positive avec les précipitations hivernales. Cette relation et sa stabilité dans le temps s'expliquent probablement par l'influence d'un climat méditerranéen assez sec. De plus, une croissance fortement réduite intervient lors d'années à hiver rigoureux et sec.

Les populations intermédiaires présentent une sensibilité assez marquée à des conditions climatiques plus froides que la normale par la réalisation d'une croissance réduite. Ces populations présentent un patron intermédiaire avec une relation aux paramètres ther-

miques assez comparable aux populations du nord et une tendance pluvio-dépendante semblable à celle des populations du sud. Ces populations, situées en zone interne des Alpes, sont soumises à un jeu d'influences climatiques continentales et méditerranéennes (et océaniques à un moindre degré) qui les rend probablement plus sensibles à des conditions rigoureuses.

Cette étude a aussi révélé une homogénéisation des relations cerne-climat sur l'ensemble des Alpes française depuis la fin du XIX^e s. qui se manifeste par une augmentation de l'impact des précipitations hivernales sur l'ensemble des populations. Cette tendance pourrait refléter l'impact de l'augmentation des températures sur la disponibilité hydrique ultérieurement dans l'année, c'est à dire au moment du redémarrage de la croissance.

2 - Complexité de la relation entre le climat et la croissance radiale du Pin cembro

Les résultats de cette étude mettent aussi en évidence l'importance des facteurs environnementaux de l'année qui précède la croissance (Oberhuber, 2004 ; Oberhuber *et al.*, 2008 ; Pfeifer *et al.*, 2005) et la grande variabilité spatiale, temporelle et intraspécifique des relations cerne-climat chez le Pin cembro :

- les deux approches ont montré la variabilité spatiale traduite par l'importance du gradient nord-sud. Les populations les plus septentrionales apparaissent très thermo-dépendantes avec l'influence négative d'une période froide au cours de l'année et une relation positive à plusieurs paramètres thermiques. Au sud, les populations

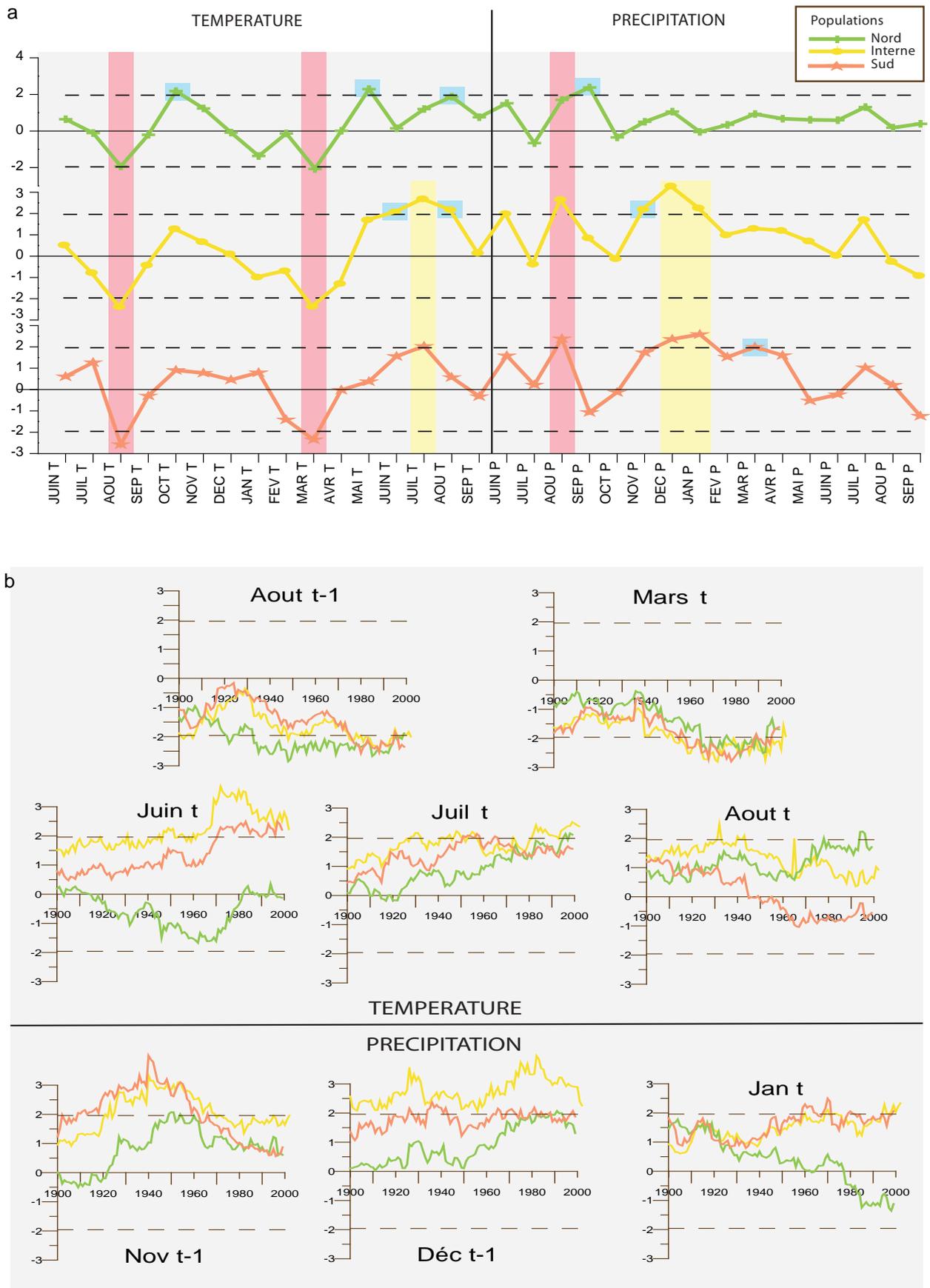


Figure 6 - Résultats du calcul des fonctions de réponses :
 a) Fixes selon les groupes ;
 b) Mobiles par groupes selon le paramètre climatique considéré.

révèlent une pluvio-dépendance importante, probablement liée aux influences méditerranéennes, avec une relation très positive à des précipitations élevées en hiver et une croissance perturbée en cas d'hiver très sec et extrêmement froid. Pour ces dernières, les conditions thermiques qui influencent significativement la croissance sont celles de l'été, à l'image des populations de pin cembro suisses et autrichiennes (Frank et Esper, 2005 ; Oberhuber *et al.* , 2008). Dans la zone intermédiaire, les populations présentent un patron de relation cerne-climat de plus en plus similaire à celui des populations du sud en relation avec des influences climatiques complexes et multiples ;

- la complexité des relations cerne-climat est accentuée par l'instabilité de la réponse de l'espèce aux paramètres mensuels et aux extrêmes climatiques dans le temps. En effet, la relation cerne-climat tend à s'homogénéiser sur l'ensemble des Alpes depuis près d'un siècle. L'importance significative de conditions thermiques estivales clémentes permettant une croissance optimale a déjà été démontrée (Tranquillini, 1979 ; Frank et Esper, 2005). La relation significativement positive aux précipitations hivernales, également démontrée, a été expliquée par le rôle protec-

teur du couvert neigeux (Beniston *et al.*, 2003 ; Carrer *et al.*, 2007). Néanmoins, cette relation stable pour les populations les plus méridionales et intermédiaires mais apparue récemment au nord semble traduire l'émergence d'un facteur limitant de la croissance pour ces populations. De ce fait, l'influence positive des précipitations pourrait s'expliquer par leur contribution à la restauration hydrique des sols préalablement au redémarrage de la croissance dans un contexte de réchauffement climatique (IPCC, 2007) ;

- enfin, une variabilité intra-spécifique a été mise en évidence par l'étude des années caractéristiques. Dans des conditions climatiques extrêmes identiques sur un même site, les réactions de l'espèce apparaissent aléatoires et non prédictibles. Cette variabilité pourrait être expliquée par le jeu de compensation, ou d'amplification des facteurs climatiques, et une capacité d'évitement de l'espèce qui se manifeste par la possibilité de stocker des réserves pouvant être mobilisées en cas de stress (Wieser *et al.*, 2004). Afin de mieux comprendre cette variabilité intra-spécifique de la relation cerne-climat, il serait donc pertinent d'étudier les conditions climatiques prévalant dans les années antérieures (t-2 et t-3).

CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont montré l'importance des températures estivales et des précipitations hivernales sur la croissance radiale du Pin cembro dans l'ensemble des Alpes françaises. Ils révèlent également une répartition spatiale de la réponse des arbres au climat avec une relation variant du nord au sud qui tend à s'homogénéiser depuis la fin du XIX^e s. C'est la première fois qu'une étude souligne l'influence des variations climatiques liées au gradient latitudinal sur la croissance radiale de cette espèce.

Les résultats de cette étude ont également mis en évidence la grande complexité de la relation cerne-climat chez le Pin cembro à travers sa grande variabilité spatiale, temporelle et intra-spécifique. Ce constat soulève de nombreuses interrogations quant à la mise en place d'une méthode adaptée pour intégrer cette espèce dans des reconstructions climatiques ou dans des modélisations du climat.

Remerciements

Cette publication est une contribution au projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (programme VMC, projet ANR-06-VULN-010, ESCARSEL) et soutenue par les Parc National du Mercantour, le Parc Naturel Régional du Queyras et l'Office Nationale des Forêts. Nous remercions beaucoup I.Aüer pour nous avoir fourni la dernière version de la base de données HISTALP. Un remerciement particulier à V. Petitcolas et Fleur-Meijer pour leur mise à disposition de respectivement 10 et 1 chronologies.

BIBLIOGRAPHIE

- AUER I., BOHM R., JURKOVIC A., WOLFGANG L., ORLIK A., POTZMANN R., SCHONER W., UNGERSBOCK M., MATULLA C., BRIFFA K., JONES P., EFTHYMIADIS D., BRUNETTI M., NANNI T., MAUGERI M., MERCALLI L., MESTRE O., MOISSELIN J.M., BEGERT M., MÜLLER-WESTERMEIER G., KVETON V., BOCHNICEK O., STASTNY P., LAPIN M., SZALAI S., SZENTIMREY T., CEGNAR T., DOLINAR M., GAJIC-CAPKA M., ZANINOVIC K., MAJSTOROVIC Z., NIEPLOVA E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int. J. Climatol.*, 27, 17-46.
- BENISTON M., KELLER F., KOFFI B., GOYETTE S., 2003. Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theor. Appl. Clim.*, 76, 125-140.
- BIONDI F., WAIKUL K., 2004. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Comput. Geosci.*, 30, 303-311.
- BÖHM R., JONES P.D., HIEBL J., FRANK D., BRUNETTI M., MAUGERI M., soumis. The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760-2007. *Clim. Chang.*, soumis.
- CARRER M., URBINATI C., 2004. Age-dependent tree-ring growth response to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology*, 85 (3), 730-740.
- CARRER M., NOLA P., EDOUARD J.L., MOTTA R., URBINATI C., 2007. Regional variability of climate–growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology*, 95, 1072-1083.
- COOK E.R., HOLMES R.L., 1984. Program ARSTAN user manual: laboratory of tree ring research. University of Arizona, Tucson.
- CROPPER, J.P., 1979. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin*, 39, 47-59.
- EFFRON B., 1979. Bootstrap Methods: Another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7 (1), 1-26.
- FRANK D., ESPER J., 2005. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia*, 22, 107-121.
- FRITTS H. C., 1976. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 567 p.
- GRACE J., BERNINGER F. and NAGY L., 2002. Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 90, 537-544.
- IPCC. Regional Climate Projections. In : SOLOMON, S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER H.L. (Ed.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.
- JOLLIFFE I.T., 2002. *Principal Component Analysis*. Springer, New York.
- LEROY-LADURIE. Histoire humaine et comparée du climat, éd. Fayard ; t. 1 Canicules et glaciers XIII^e-XVIII^e siècles, 2004 ; t. 2, Disettes et révolutions, 2006.
- MOTTA R., NOLA P., 1996. Dendrochronological signal in three stone pine (*Pinus cembra* L.) chronologies from the Western Italian Alps. *Dendrochronologia*, 14, 43-57.
- NEUWIRTH B., SCHWEINGRUBER F.H., WINIGER M., 2007. Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, 24, 79-89.
- OBERHUBER W., 2004. Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiol.*, 24, 291-301.
- OBERHUBER W., KOFLER W., PFEIFER K., SEEBER A., GRUBER A., WIESER G., 2008. Long-term changes in tree-ring–climate relationships at Mt. Patscherkofel (Tyrol, Austria) since the mid-1980s. *Trees*, 22, 31-40.
- PETITCOLAS V., ROLLAND C., 1998. Comparaison dendroécologique de *Larix decidua* Mill., *Pinus cembra* L. et *Pinus uncinata* Mill. ex Mirb. dans l'étage subalpin du Briançonnais (Hautes-Alpes, France). *Ecology*, 29, 305-310.
- TRANQUILLINI W., 1979. *Physiological Ecology of the Alpine Timberline*. Springer Verlag, Berlin, 137 p.
- WIESER G. et BAHN M., 2004. Seasonal and spatial variation of woody tissue respiration in a *Pinus cembra* tree at the alpine timberline in the central Austrian Alps. *Trees-Structure and Function*, 18, 576-580.

Dendroclimato-reconstruction de la température de la saison de croissance dans le Nord de la France, depuis 1498, à partir de dates de vendanges bourguignonnes et du $\delta^{18}\text{O}$ des chênes de Fontainebleau

DAUX V.^{1,2}, ETIEN N.¹,
MASSON-DELMOTTE V.¹, STIEVENARD M.¹

¹Laboratoire des Sciences du Climat
et de l'Environnement (LSCE), Gif-sur-Yvette.

²Université Paris 6, Paris.

Contact : valerie.daux@lsce.ipsl.fr

RÉSUMÉ

Une nouvelle méthodologie a été développée pour estimer les variations passées de la température de la saison de croissance dans le Nord de la France. Elle repose sur l'utilisation conjointe de séries de températures instrumentales homogénéisées (1879-2007), de dates de vendanges bourguignonnes (DdV) et de compositions isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de la cellulose des chênes de la forêt et des poutres du château de Fontainebleau. Les séries de $\delta^{18}\text{O}$

et de DdV sont corrélées de façon statistiquement significatives à celles des températures de la saison de croissance (Avr-Sep ; $R=0,58$, $p < 6,4 \cdot 10^{-12}$ et $R=-0,68$, $p < 2 \cdot 10^{-16}$ respectivement). Toutefois, les données de $\delta^{18}\text{O}$ comme celles de DdV peuvent être influencées par des facteurs autres que la température (insolation locale, disponibilité en eau, causes anthropiques, etc). Une combinaison linéaire des deux paramètres a été utilisée pour réduire l'influence de biais potentiels sur les séries de façon à reconstruire les fluctuations interannuelles de la saison de croissance dans le Nord de la France de 1498 à 2000 (TGS). Sur la période instrumentale, la série reconstruite, dont l'incertitude est estimée à environ $1,1^\circ\text{C}$, est bien corrélée avec les températures mesurées ($R^2=0,60$). Elle confirme que la tendance au réchauffement actuelle est sans précédent sur les 5 derniers siècles. Elle met également en évidence quelques décennies chaudes à la fin du XVII^e siècle, au sein de la période plutôt fraîche du Petit Âge Glaciaire (XIV^e-XIX^e). Les années de chaleur ou de froid extrême identifiées dans cette reconstruction sont corroborées par des éléments historiques.

Analyses des relations entre la variation de la largeur des cernes de *Polylepis* et le climat tropical Andin

JOMELLI V., PAVLOVA I.,
GRANCHER D., GEAI M.-L.

Laboratoire de Géographie Physique
de Meudon, CNRS, Meudon.

Contact : jomelli@cnrs-bellevue.fr

RÉSUMÉ

Les archives climatiques à haute résolution sont rares dans les régions tropicales d'altitude. Dans les Andes, les carottes de glace constituent un indicateur de première importance mais l'interprétation du signal isotopique reste encore très controversée. Dans ce contexte, la présence de *Polylepis* au dessus de 3000 m d'altitude apparaît être une source d'information complémentaire. C'est à cette fin que nous avons entrepris des recherches sur les relations cernes-climat pour différentes espèces de *Polylepis* collectés en Bolivie et au Pérou. Cet arbre endémique, capable de se développer dans des conditions climatiques difficiles présente cependant une croissance radiale non homogène. Afin de tester l'influence de cette croissance asymétrique sur les relations cernes climat, deux types d'analyses ont été réalisées. La première, classique, a consisté à mesurer 2-4 rayons par galette et à vérifier que les variations entre les cernes restaient proportionnelles selon les rayons. Une courbe indiquée par ajustement d'une fonction

Spline fut réalisée à partir de la moyenne des rayons. Des fonctions de corrélation et de réponse furent obtenues selon la procédure classique en utilisant des séries météorologiques situées à proximité des arbres sélectionnés. Ces fonctions de réponse font apparaître des relations significatives avec la température et ou avec la précipitation durant la période de croissance. Des relations très significatives furent également observées avec l'indice ENSO pour certaines chronologies. Une seconde analyse a visé à étudier en détail l'influence de la croissance asymétrique sur la procédure classique décrite précédemment. Compte tenu des fortes variations de croissance radiale l'écart type associé à la moyenne des rayons est élevé et induit une incertitude dans les analyses climatiques.



Bosquet de *Polylepis* et échantillon dissymétrique de *Polylepis*, Andes. Photos V. Jomelli.

Datation des éruptions volcaniques par dendrochronologie

PAVLOVA I.^{1,2}, SOLOMINA O.²

¹ *Laboratoire de Géographie Physique
de Meudon, CNRS, Meudon.*

² *Institute of Geography, RAS, Russie.*

Contact : Irina.Pavlova@cnr-bellevue.fr

RÉSUMÉ

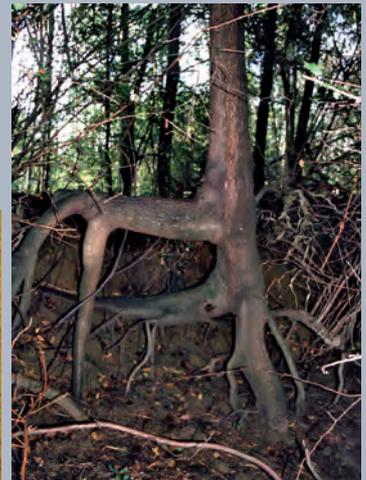
Les éruptions volcaniques sont des catastrophes naturelles qui influencent fortement le climat. La datation des éruptions passées et l'intensité de leur activité constituent donc des informations essentielles pour les reconstructions climatiques. Pour avoir une bonne connaissance de l'activité volcanique plusieurs méthodes de datation doivent être utilisées conjointement. La datation des éruptions volcaniques par dendrochronologie est une technique relativement récente qui permet d'atteindre une résolution annuelle. Pour la première

fois on a examiné les relations entre la largeur des cernes et les dates des éruptions du volcan Chivelutch. Le Chivelutch est un des volcans les plus actifs du Kamtchatka (N 56°38', E 161°19' ; altitude du dôme actif environ 2500 m, sommet 3283 m). En général les éruptions du Chivelutch perturbent fortement l'environnement en causant des lahars et autres dépôts. L'histoire holocène du volcan est assez bien connue. La plupart des dates avant 1854 AD ont été obtenues par téphrochronologie et radiocarbone. Notre objectif est d'améliorer cette chronologie des événements à partir de la dendrochronologie. Les échantillons de sapins et mélèzes ont été analysés. Afin d'identifier le signal volcanique potentiel, deux types des chronologies ont été construites – une série issue des pentes du Chivelutch et une autre située à proximité mais non influencée par l'activité du volcan. On a aussi complété notre échantillonnage en travaillant à partir d'arbres enfouis dans les dépôts dans les vallées Bajdarnaja et Kamenskaja. La comparaison des deux séries et l'analyse des arbres enfouis permettent de confirmer et de corriger la date exacte de certaines éruptions connues et de faire apparaître des éruptions non renseignées ayant eu lieu avant le milieu du XVII^e siècle.



Echantillons de bois enterrés dans les sédiments volcaniques du Shiveluch. Photo I. Pavlova.

Dendrogéomorphologie



Au recto :

En haut à gauche : disque d'un bouleau blanc blessé par une lave torrentielle de l'Illgraben, Alpes suisses (photo E. Arbellay).

En haut à droite : érosion riveraine sur les berges de la Saône (photo L. Astrade).

En bas : glissement de terrain du Bois Noir, Alpes-de-Hautes-Provences (photo J. Lopez Saez).

L'HISTOIRE DES DANGERS NATURELS SE LIT DANS LES CERNES DES ARBRES

TREE RINGS AND NATURAL HAZARDS: AN OVERVIEW

MARKUS STOFFEL

*Laboratoire de dendrogéomorphologie, Institut de Géologie, Université de Berne, Baltzerstrasse 1+3, CH 3012 Berne.
Institut des Sciences de l'Environnement (ISE), Université de Genève, 7 route de Drize, CH 1227 Carouge.*

Contact : markus.stoffel@dendrolab.ch

RÉSUMÉ

Depuis les années 1970, la recherche utilisant les cernes de croissance a graduellement évolué de la simple datation du bois vers le domaine plus vaste de la dendroécologie, comprenant tous les secteurs scientifiques qui extraient l'information environnementale des séquences de cernes. L'étude des processus géomorphologiques à l'aide des cernes de croissance représente l'un des nombreux sous-domaines de la dendroécologie. De ce fait, cet article a pour but de donner un aperçu des perturbations de croissance des arbres affectés par un processus géomorphologique et des différents processus géomorphologiques pouvant être analysés grâce aux cernes de croissance. Il est complété par quelques suggestions sur la direction future de la recherche en dendrogéomorphologie.

MOTS-CLÉS : DENDROGÉOMORPHOLOGIE, PROCESSUS GEOMORPHOLOGIQUES, PERTURBATIONS DE CROISSANCE.

ABSTRACT

Since the 1970's, tree-ring research has gradually evolved from the pure dating of wood to the much broader field of dendroecology, including all areas of science involved in drawing environmental information from tree-ring sequences. In this sense, the study of geomorphic processes with tree rings represents one of the many subfields of dendroecology. This paper therefore aims at providing an overview on (i) tree growth and tree-ring formation; (ii) growth disturbances in trees affected by geomorphic processes; (iii) the most common methods used in dendrogeomorphology (iv) the different geomorphic processes that are commonly analyzed with tree rings, before (v) suggestions are made with respect to future research directions in the field of dendrogeomorphology.

KEYWORDS: DENDROGEOMORPHOLOGY, GEOMORPHIC PROCESSES, GROWTH DISTURBANCES.

INTRODUCTION

La recherche dendrogéomorphologique, d'abord décrite par Alestalo (1971), est habituellement basée sur le concept de «processus-événement-réponse» défini par Shroder (1980). Le «processus» est représenté par un agent géomorphologique tel une lave torrentielle, une chute de pierres ou une avalanche. L'«événement»

correspond au moment où le processus affecte un arbre, lequel réagira à la perturbation par une certaine «réponse» de croissance. Les différents impacts («événements») qu'un processus géomorphologique peut avoir sur un arbre ainsi que les «réponses» spécifiques à ces événements sont décrits et illustrés ci-dessous.

I - COMMENT LES ARBRES RÉAGISSENT-ILS AUX PROCESSUS GÉOMORPHOLOGIQUES ?

1 - Blessures et formation de canaux résinifères

Les rayures sur l'écorce et les blessures pénétrant le bois sont des caractéristiques très fréquentes des arbres affectés par des processus géomorphologiques. Les blessures peuvent être observées sur le tronc de l'arbre (Figure 1a) ainsi que sur ses branches ou racines. Si l'énergie de l'impact est suffisamment importante pour détruire localement le cambium, la croissance de l'arbre sera perturbée dans le segment blessé. Afin de minimiser le risque de pourriture et les attaques d'insectes dans l'ouverture créée par l'impact, l'arbre accidenté va «compartmentaliser» la blessure et presque immédiatement initier la production de tissu calleux sur les bords de la blessure (Figure 1c). Grâce à la production de ce tissu calleux, les cellules formées par le cambium vont recouvrir progressivement la blessure à partir de ses bords (Figure 1b) et idéalement la refermer complètement.

Certaines espèces de conifères comme *Larix decidua*, *Picea abies* ou *Abies alba* produisent des rangées tangentes de canaux résinifères traumatiques (TRD) dans le xylème formé après la blessure (Figure 1d). Si la blessure survient durant la période de végétation, la production de résine commencera seulement quelques

jours après l'événement et les canaux résinifères seront formés en moins de trois semaines (Luchi *et al.*, 2005). La position intra-saisonnière des TRD peut ainsi être utilisée pour la reconstitution d'événements passés avec une précision mensuelle (Stoffel et Hitz, 2008). Toutefois, en s'éloignant axialement comme tangentiellement de la blessure, les TRD ont tendance à migrer vers des portions plus tardives du cerne (Bollschweiler *et al.*, 2008b ; Schneuwly *et al.*, 2009a, b).

2 - Inclinaison du tronc

La pression soudaine induite par l'activité et le dépôt de matériaux des mouvements de masse (par ex., neige d'avalanche, matériaux de lave torrentielle) ou la lente, mais continue déstabilisation d'un arbre par un glissement de terrain ou encore l'érosion peuvent conduire à l'inclinaison du tronc. Les arbres inclinés sont nombreux dans les zones influencées par des processus géomorphologiques (Figure 2a) et ont donc été utilisés dans de nombreuses études dendrogéomorphologiques pour dater des événements passés (Braam *et al.*, 1987 ; Fantucci et Sorriso-Valvo, 1999). Un arbre incliné essaiera toujours de reprendre sa position verticale et la réaction sera la plus marquée dans le segment de l'arbre

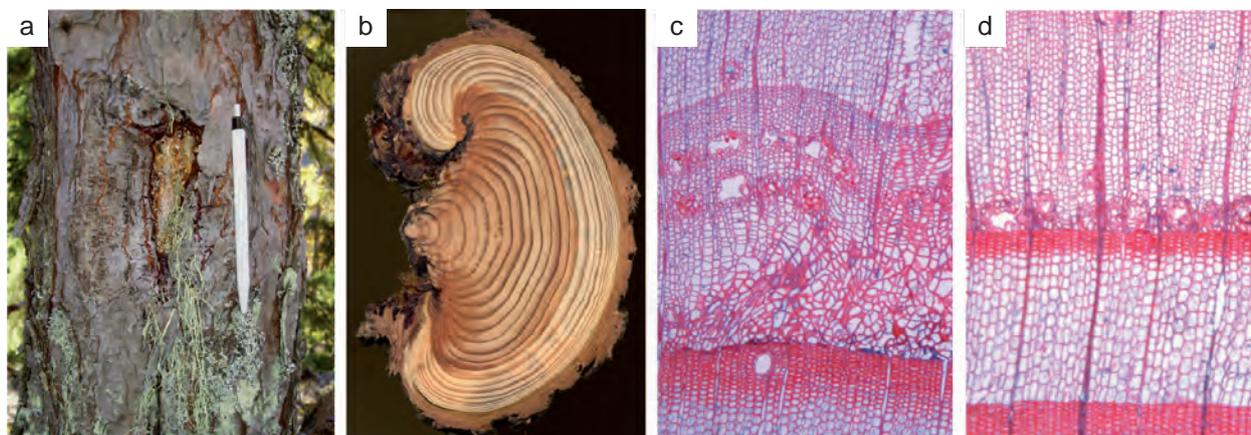


Figure 1 - Blessures de *Larix decidua* : (a) Tronc blessé ; (b) Section avec excroissance se formant sur les bords latéraux de la blessure ; (c) Tissu calleux tel qu'observé dans les rangées de cellules de l'excroissance bordant la blessure ; (d) Rangées tangentes de canaux résinifères traumatiques migrant du bois initial vers des portions plus tardives du cerne en s'éloignant de la blessure (Stoffel et Bollschweiler, 2008).

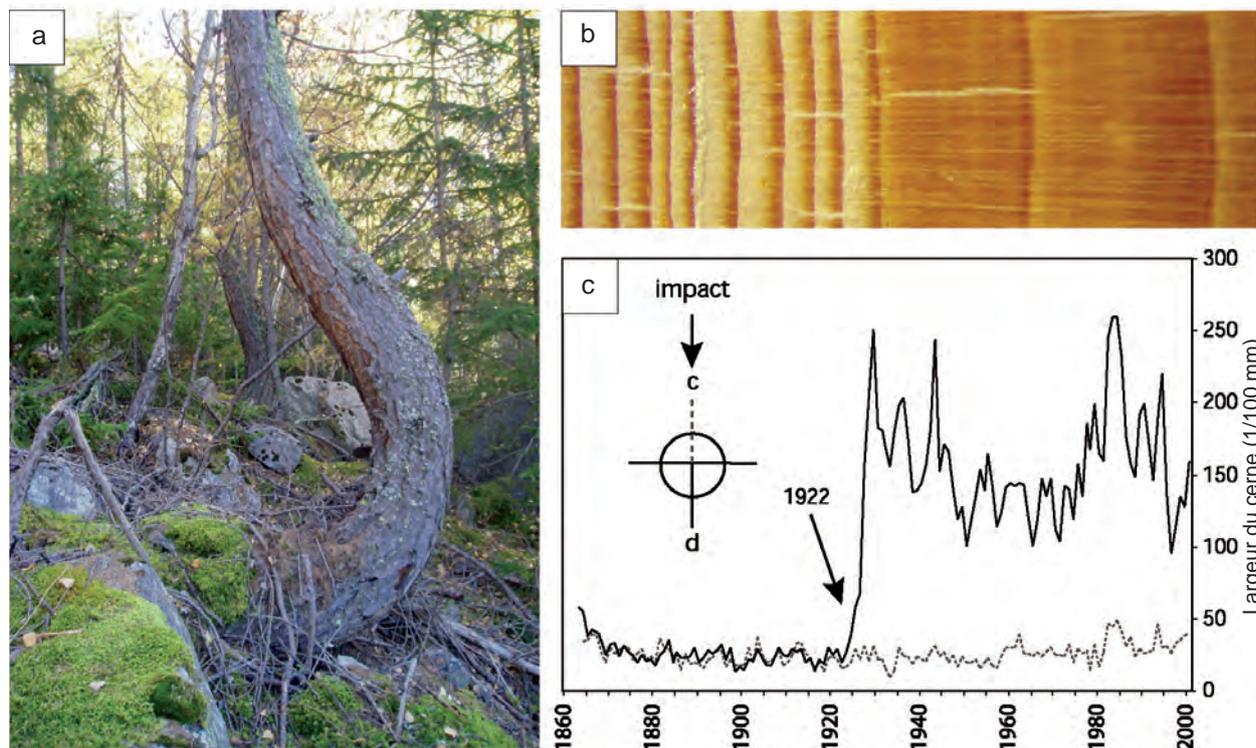


Figure 2 - (a) Morphologie et (b) section d'un *Larix decidua* incliné (D. M. Schneuwly) ; (c) Courbes de croissance d'un *Picea abies* incliné par une lave torrentielle en 1922 (Stoffel et al., 2005 b). La courbe solide (côté aval - d) montre une augmentation flagrante de croissance suite à l'inclinaison du tronc en 1922 ; la courbe en tirets (côté amont - c) n'indique, quant à elle, aucune variation abrupte de croissance.

où le centre de gravité a été déplacé lors de l'inclinaison du tronc. La croissance excentrique résultant de l'inclinaison sera visible dans les séquences de cernes, ce qui permettra une datation précise de l'événement (Figure 2c). Chez les conifères, du bois de compression sera produit sur le côté aval du tronc incliné. Les cernes y seront considérablement plus grands et d'apparence plus foncée (Figure 2b). La différence de couleur est due au fait que les trachéides du bois initial et final ont des parois cellulaires plus épaisses et arrondies (Timell, 1986). Au contraire des conifères, les feuillus réagiront à l'inclinaison de leur tronc par la formation de bois de tension (Westing, 1965) et l'excentricité apparaîtra sur le côté amont du tronc.

3 - Enfouissement du tronc

Les laves torrentielles, les inondations ou les glissements de terrain peuvent occasionnellement enfouir des arbres en déposant des matériaux autour de la base de leur tronc (Figure 3a). La croissance de ces arbres sera réduite car l'apport d'eau et de nutriments sera temporairement interrompu ou du moins limité (Figure 3b ; LaMarche, 1966 ; Friedman *et al.*, 2005). Dès que l'enfouissement dépasse un certain seuil, les arbres ne survivent pas et meurent par manque d'eau et de nutriments (Figure 3a). Selon les résultats d'études effectuées dans les Dolomites (Strunk, 1997), *Picea abies*

peut tolérer une profondeur d'enfouissement maximale de 1,9 m de matériaux fins. Occasionnellement, les arbres au tronc enfoui produisent des racines adventives à proximité de la nouvelle surface du sol (Figure 3c ; Bannan, 1941). Comme la formation de ces racines adventives commence dans les premières années suivant l'enfouissement, le moment de germination des racines peut être utilisé pour dater approximativement le processus de sédimentation (Marin et Filion, 1992).

4 - Étêtement et élimination de branche

Les chutes de pierres, l'écoulement d'eau charriant des matériaux solides, les laves torrentielles ou le souffle d'une avalanche peuvent causer un étêtement de l'arbre (Figure 4a) ou la cassure de branches. La perte de couronne ou de branches est plus fréquente parmi les grands arbres dont les tiges ont perdu de leur souplesse. La perte d'apex a également été observée en relation avec des impacts de chutes de pierres proches de la surface du sol. Dans ce cas particulier, la propagation sinusoïdale des ondes de choc dans le tronc provoque la décapitation de l'arbre. Les arbres réagissent à l'étêtement par une diminution sensible de croissance. Afin de rétablir la situation, une ou plusieurs branches latérales vont prédominer et ainsi remplacer la couronne brisée, déterminant ainsi une morphologie de croissance en «candélabre» (Figure 4b ; Butler et Malanson, 1985).

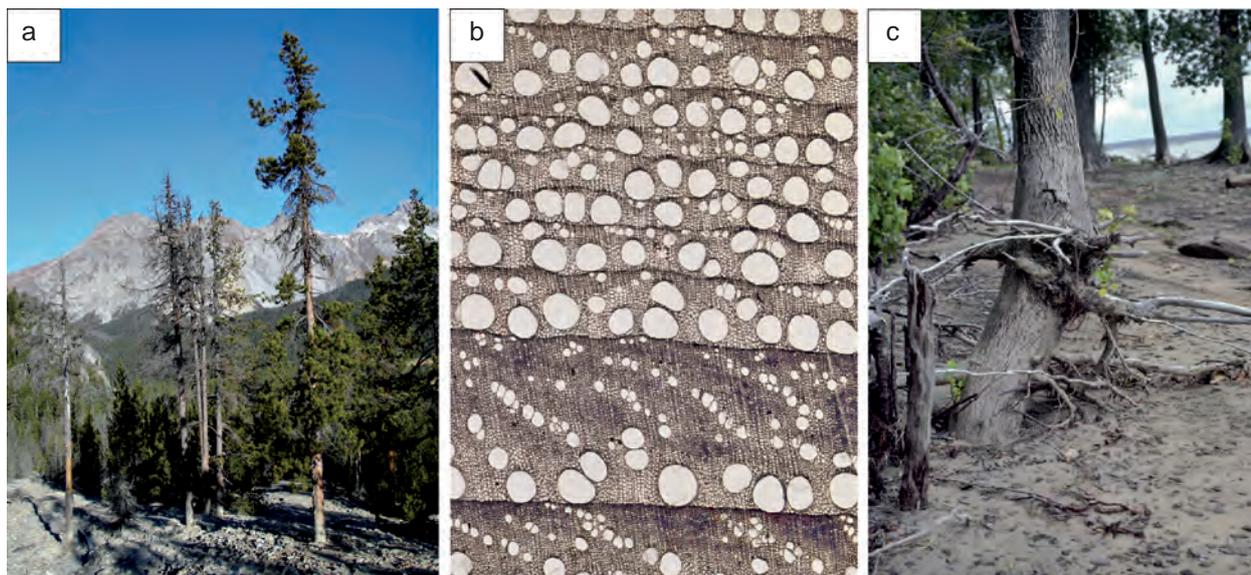


Figure 3 - (a) Sédimentation et dépérissement consécutif d'arbres ; (b) Lame mince montrant une baisse abrupte de croissance chez *Castanea sativa* suite à un événement (F. H. Schweingruber) ; (c) Plusieurs niveaux de racines adventives chez *Populus deltoides* (F. H. Schweingruber).

5 - Mise à nu des racines

Les processus d'érosion et de déchaussement des racines peuvent générer des réactions de croissance aussi bien dans le tronc que dans les racines exposées. De plus, le type et l'intensité des réactions dépendront fortement de la nature de l'événement érosif, lequel peut se produire sous la forme d'un processus continu ou soudain. Dans le cas où plusieurs racines sont complètement dénudées lors d'un événement érosif soudain, elles ne seront plus en mesure de remplir leurs fonctions vitales et mourront rapidement. Par conséquent, l'arbre souffrira d'une baisse de croissance et formera des cernes étroits dans le tronc (LaMarche, 1968 ; McAuliffe *et al.*, 2006).

6 - Recolonisation des surfaces ravagées

Les mouvements de masse dévastateurs ont le potentiel d'éliminer des forêts entières, rendant impossible la reconstitution d'événements passés par les méthodes dendrogéomorphologiques. Dans ce cas, l'âge de germination des nouvelles pousses sur la surface dénudée peut être utilisé pour estimer le moment de déboisement du milieu par le processus géomorphologique. L'approche reste cependant une approximation, étant donné que le temps écoulé entre le déboisement et la recolonisation dépend de la nature du sol, des conditions climatiques ainsi que de la disponibilité de semis. La « datation d'âge minimum » a été utilisée à plusieurs reprises pour dater des

formes de terrain ou pour évaluer la période de temps minimale s'étant écoulée depuis le dernier événement dévastateur dans des couloirs d'avalanche, des chenaux de lave torrentielle ou des plaines inondables (Sigafos et Hendricks, 1969 ; McCarthy et Luckman, 1993 ; Bollschweiler *et al.*, 2008a).

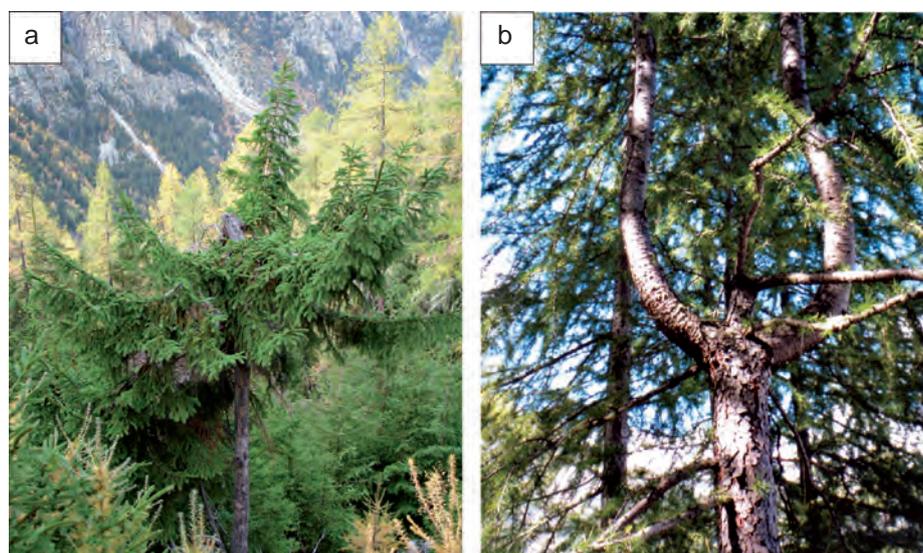


Figure 4 - (a) *Picea abies* étêtée par une chute de pierres ; (b) Croissance en candélabre chez *Larix decidua* suite à la perte d'apex.

II - QUELS PROCESSUS GÉOMORPHOLOGIQUES SONT ANALYSÉS À L'AIDE DES CERNES DE CROISSANCE ?

La dendrogéomorphologie a été largement utilisée durant ces dernières décennies pour l'analyse et la reconstitution d'une multitude de processus géomorphologiques (Stoffel et Bollschweiler, 2009). Ce chapitre ne prétend donc pas être exhaustif, mais se référera à une sélection de publications pionnières et présentera quelques articles significatifs traitant de différents processus de dangers naturels.

Les premières études concernant les dangers naturels étaient axées sur les inondations et les processus de sédimentation. Les bases théoriques pour l'analyse de ces processus ont été définies par Sigafos (1964) avant la naissance de la dendrogéomorphologie proprement dite. St. George et Nielsen (2000) ont analysé les modifications anatomiques (« *flood rings* ») chez *Quercus macrocarpa* pour identifier les inondations de grande ampleur au Canada au cours du XIX^e siècle. En Europe, seules quelques études se sont concentrées sur les inondations jusqu'ici, par exemple celle publiée par Astrade et Bégin (1997) documentant les récentes inondations d'été de la Saône à l'aide des cernes de *Populus tremula* et *Quercus robur*.

Après les études pionnières de Hupp (1984) en Californie, les laves torrentielles ont été largement étudiées dans les Alpes par le biais de la dendrogéomorphologie, notamment pour reconstituer l'activité de laves torrentielles dans les Dolomites (Italie ; Strunk 1991, 1997). Plus récemment, une multitude de torrents ont été examinés dans les Alpes suisses (Bollschweiler et Stoffel, 2007 ; Bollschweiler *et al.*, 2007 ; Szymczak *et al.*, 2010). L'exemple le plus probant est l'étude de 2450 séquences de cernes de conifères vivant sur le cône du Ritigraben. Cette étude a délivré des données sur 124 événements de lave torrentielle identifiés depuis 1570, la plupart datés avec une précision mensuelle (Stoffel et Beniston, 2006 ; Stoffel *et al.*, 2008) et complétés d'une indication sur la taille de l'événement (Stoffel, 2010). Les études sur les glissements de terrain ont débuté dans les années 80 avec quelques recherches réalisées au Québec (Bégin et Filion, 1985 ; Filion *et al.*, 1991) et dans les Alpes françaises (Braam *et al.*, 1987). En Italie, la dendrogéomorphologie a été utilisée à plusieurs reprises pour identifier l'histoire et la dynamique des glissements de terrain (Fantucci et Sorriso-Valvo, 1999).

Les événements passés d'avalanches de neige ont été aussi analysés. Pendant longtemps, les analyses d'avalanches basées sur les cernes de croissance ont été

exclusivement effectuées au Canada (Schaerer, 1972) et aux Etats-Unis (Butler, 1979). Étrangement, très peu d'études existent à ce jour sur les avalanches dans les Alpes : Stoffel *et al.* (2006 a) ont étudié un site en Suisse et ont pu distinguer les dommages causés par le souffle d'avalanche de ceux causés par le transport de neige et de matériaux. Il y a seulement quelques années, des analyses d'avalanches basées sur les cernes de croissance ont été initiées dans les Alpes françaises (Corona *et al.*, 2010), les Pyrénées (Muntán *et al.*, 2009) et dans les Andes en Argentine (Mundo *et al.*, 2007 ; Casteller *et al.*, 2008). En ce qui concerne l'évaluation du risque, l'attention s'est davantage tournée vers l'identification d'événements extrêmes et la datation d'avalanches de grande intensité dans la Gaspésie (Boucher *et al.*, 2003 ; Dubé *et al.*, 2004) et le Parc National Glacier (Butler et Sawyer, 2008).

L'activité des chutes de pierres n'a été que rarement étudiée par l'analyse de séquences de cernes (Stoffel, 2006). Les premières investigations pour analyser la saisonnalité, la fréquence et les caractéristiques spatiales de l'activité des chutes de pierres ont été réalisées très récemment par Stoffel *et al.* (2005 a, c) qui ont reconstitué 400 ans d'activité de chutes de pierres sur une pente boisée des Alpes suisses. Depuis, les méthodes utilisées ont été appliquées sur d'autres sites en Suisse par Perret *et al.* (2006) ou Schneuwly et Stoffel (2008 a, b), constituant ainsi une base fiable pour l'analyse des risques de chutes de pierres et pour l'évaluation de la qualité des modèles s'y rapportant (Stoffel *et al.*, 2006 b).

Les risques géologiques sont un autre domaine où la dendrogéomorphologie peut apporter des données fiables sur la chronologie et la localisation d'événements passés. La méthode a été largement utilisée pour étudier les tremblements de terre centenaires le long de la faille de San Andreas en Californie ou dans la région de Seattle (Jacoby *et al.*, 1992 ; Jacoby, 1997). Depuis l'explosion catastrophique du St. Helens en 1980, la dendrogéomorphologie a été également utilisée pour la datation d'éruptions volcaniques. Ainsi, Salzer et Hughes (2007) sont parvenus à identifier 500 ans d'éruptions volcaniques à travers l'étude de *Pinus aristata*. Solomina *et al.* (2008) ont daté différentes éruptions volcaniques en Russie à partir de la datation des cernes de souches conservées dans les dépôts de lave. Sur les flancs du volcan Popocatepetl (Mexique), Bollschweiler *et al.* (2010) ont daté plusieurs événements de coulée de boue volcanique.

III - PERSPECTIVES ET ORIENTATIONS FUTURES DE LA RECHERCHE

Durant les dernières décennies, la dendrochronologie a continuellement évolué. D'un simple outil pour dater le bois, elle est devenue une science reconnue, une véritable colonne vertébrale pour les reconsti-

tutions chronologiques de l'Holocène (Solomina, 2002). La dendrogéomorphologie a été passablement utilisée dans l'analyse de plusieurs types de dangers tels les avalanches, laves torrentielles, glissements de

terrain ou inondations. En plus de la simple datation et reconstitution d'événements géomorphologiques passés au niveau d'un site, les résultats de différentes régions devraient être comparés pour une compréhension plus complète de l'influence des déclencheurs climatiques ainsi que des causes endogènes de l'occurrence d'événements. Une comparaison des chronologies d'événements régionaux ou suprarégionaux avec des réseaux (dendro-)climatologiques aiderait certainement à cet égard. Pour l'instant, les études dendrogéomorphologiques comparatives se concentrant sur les comportements et déclencheurs régionaux des différents processus géomorphologiques restent très rares (Bollschweiler et Stoffel, 2010). Cela est également vrai pour les études sur les risques actuels et futurs que les processus peuvent causer (Lugon et Stoffel, soumis).

Outre l'application des techniques dendrogéomorphologiques communément acceptées et la datation d'événements, la recherche devrait également se concentrer à l'avenir sur les réactions physiologiques et chimiques des arbres aux perturbations ainsi que sur des espèces qui ont été négligées jusqu'ici (en général des feuillus, des buissons ou des herbes pérennes). Est-ce que l'intensité d'un impact ou la durée d'un événement influence la nature d'une réaction ? Après combien de temps un arbre montre-t-il les premiers signes d'un événement et y a-t-il différents temps de réponse pour différents types de réaction ? Il est nécessaire de poursuivre d'abord la recherche sur l'initiation chimique et la formation actuelle de bois de réaction et de TRD. De nouvelles idées pour-

raient être développées sur la création artificielle de blessures pénétrantes, sur l'enfouissement du tronc, le déchaussement des racines ou la déstabilisation (inclinaison) des arbres. Il serait également possible d'analyser les arbres qui ont été endommagés par des événements passés bien documentés. Des progrès notables devraient être accomplis au travers d'examen détaillés de l'anatomie du bois et d'analyses des modifications de la cellule suite à une perturbation.

Des progrès importants ont été faits dans les domaines décrits dans cet article, mais beaucoup restent à faire pour parfaire cette technique unique. La recherche effectuée avec de nouvelles espèces ou parties de l'arbre devra aller plus loin que le décompte des cernes de croissance et inclure des comparaisons statistiques de chronologies de cernes afin d'apporter des réponses plus rigoureuses et éviter des erreurs d'interprétation.

Le passé est la clé du futur et une connaissance détaillée de l'activité des anciens processus sera d'une aide précieuse pour la compréhension et la gestion des processus actuels et peut-être même pour la prévision d'événements futurs. Il est donc important de réaliser qu'outre la création de chronologies, les données dendrogéomorphologiques doivent être utilisées comme outil et comme base de données pour l'évaluation des dangers et des risques (Stoffel *et al.*, 2010), pour l'identification des infrastructures et terrains exposés au danger et pour l'évaluation précise et l'amélioration ultérieure des modèles géomorphologiques basés sur les processus (Stoffel *et al.*, 2006 b).

Remerciements

L'auteur tient à remercier Igor Lièvre et Estelle Arbella pour leur aide dans la traduction du manuscrit ainsi que Oliver M. Hitz, Dominique M. Schneuwly, Werner Schoch et Fritz H. Schweingruber pour leurs crédits photographiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-139.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saône river, France. *Ecoscience*, 4, 232-239.
- BANNAN, M.W., 1941. Variability in root structure in roots of native Ontario conifers. *Bulletin of the Torrey Botany Club*, 68, 173-194.
- BÉGIN C., FILION L., 1985. Analyse dendrochronologique d'un glissement de terrain dans la région du Lac de l'Eau Claire (Québec nordique). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22, 175-182.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., 2010. Trends and changes in debris-flow frequency since 1850 – results from eight torrents in the Zermatt valley. *The Holocene*, sous presse.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., 2007. Debris flows on forested cones – reconstruction and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 207-218.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., VAZQUEZ-SELEM L., PALACIOS D., 2010. Spatio-temporal reconstruction of lahar activity in Barranca Huiloac (Volcán Popocatepetl, México). *The Holocene*, sous presse.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., 2008a. Dynamics in debris-flow activity on a forested cone – a case study using different dendroecological approaches. *Catena*, 72, 67-78.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., BOURQUI K., 2008b. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology*, 28, 255-263.

- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., EHMISCH M., MONBARON M., 2007. Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity with dendrogeomorphological methods. *Geomorphology*, 87, 337-351.
- BOUCHER D., FILION L., HÉTU B., 2003. Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, en Gaspésie centrale (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, 57, 159-168.
- BRAAM R.R., WEISS E.E. J., BURROUGH A., 1987. Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena*, 14, 573-584.
- BUTLER D.R., 1979. Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research*, 11, 17-32.
- BUTLER D.R., SAWYER C., 2008. Review and comparison of the different methods used for dating high-magnitude snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 303-309.
- BUTLER D.R., MALANSON G.P., 1985. A history of high-magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, USA. *Mountain Research and Development*, 5, 175-182.
- CASTELLER A., CHRISTEN M., VILLALBA R., MARTÍNEZ H., STÖCKLI V., LEIVA J., BARTELT P., 2008. Validating numerical simulations of snow avalanches using dendrochronology: The Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Nat. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 433-443.
- CORONA C., ROVÉRA G., LOPEZ SAEZ J., STOFFEL M., PERFETTINI P., 2010. Apport de la dendrogeomorphologie pour la reconstruction spatio-temporelle des avalanches. L'exemple du dépôt avalancheux Pierres Jean Jeanne, Massif de l'Oisans, France. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009. *Collection Edytem*, 11, 109-116.
- DUBÉ S., FILION L., HÉTU B., 2004. Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36, 555-564.
- FANTUCCI R., SORRISO-VALVO M., 1999. Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). *Geomorphology*, 30, 165-174.
- FILION L., QUINTY F., BÉGIN C., 1991. A chronology of landslide activity in the valley of Rivière du Gouffre, Charlevoix, Quebec. *Canadian Journal of Earth Science*, 28, 250-256.
- FRIEDMAN J.M., VINCENT K.R., SHAFROTH P.B., 2005. Dating floodplain sediments using tree-ring response to burial. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1077-1091.
- HUPP C. R., 1984. Dendrogeomorphic evidence of debris flow frequency and magnitude at Mount Shasta, California. *Environment Geology Water Science*, 6, 121-128.
- JACOBY G.C., 1997. Application of tree ring analysis to paleoseismology. *Review of Geophysics*, 35, 109-124.
- JACOBY G.C., WILLIAMS P.L., BUCKLEY B.M., 1992. Tree ring correlation between prehistoric landslides and abrupt tectonic events in Seattle, Washington. *Science*, 258, 1621-1623.
- LAMARCHE V.C., 1968. Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 352-I, 341-377.
- LAMARCHE V.C., 1966. An 800-year history of stream erosion as indicated by botanical evidence. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 550 D, 83-86.
- LUCHI N., MA R., CAPRETTI P., BONELLO P., 2005. Systemic induction of traumatic resin ducts and resin flow in Austrian pine by wounding and inoculation with *Sphaeropsis sapinea* and *Diplodia scrobiculata*. *Planta*, 221, 75-84.
- LUGON R., STOFFEL M., soumis. Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris-flow activity in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*.
- MARIN P., FILION L., 1992. Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research*, 38, 316-330.
- MCAULIFFE J.R., SCUDERI L.A., MCFADDEN L.D., 2006. Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: Landscape responses to climate variation during the last 400yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Global and Planetary Change*, 50, 184-201.
- MCCARTHY D.P., LUCKMAN B.H., 1993. Estimating ecesis for tree-ring dating of moraines: a comparative study from the Canadian Cordillera. *Arctic and Alpine Research*, 25, 63-68.
- MUNDO IA., BARRERA M.D., ROIG F.A., 2007. Testing the utility of *Nothofagus pumilio* for dating a snow avalanche in Tierra del Fuego, Argentina. *Dendrochronologia*, 25, 19-28.
- MUNTÁN E., OLLER P., GARCÍA C., MARTÍ G., GARCÍA A., GUTIÉRREZ E., 2009. Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1599-1612.
- PERRET S., STOFFEL M., KIENHOLZ H., 2006. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – a dendrogeomorphological case study. *Geomorphology*, 74, 219-231.
- SALZER M.W., HUGHES M.K., 2007. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. *Quaternary Research*, 67, 57-68.
- SCHAERER P.A., 1972. Terrain and vegetation of snow avalanche sites at Rogers Pass, British Columbia. *B.C. Geographical Series*, 14, 215-222.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M., 2008a. Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years – A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 102, 522-531.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M., 2008b. Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 203-211.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2009a. Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts. *Tree Physiology*, 29, 281-289.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M., DORREN L.K.A., BERGER F., 2009b. Three-dimensional analysis of the anatomical growth response of European conifers to mechanical disturbance. *Tree Physiology*, 29, 1247-1257.
- SHRODER J.F., 1980. Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography*, 4, 161-188.

- SIGAFOOS R.H., 1964. Botanical evidence of floods and floodplain deposition. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 485-A, 1964.
- SIGAFOOS R.S., HENDRICKS E.L., 1969. The time interval between stabilization of alpine glacial deposits and establishment of tree seedlings. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 650-B, B89-B93.
- SOLOMINA O., 2002. Dendrogeomorphology: research requirements. *Dendrochronologia*, 20, 233-245.
- SOLOMINA O., PAVLOVA I., CURTIS A., JACOBY G., PONOMAREVA V., PEVSNER M., 2008. Constraining recent Shiveluch volcano eruptions (Kamchatka, Russia) by means of dendrochronology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 1083-1097
- ST. GEORGE S., NIELSEN E., 2000. Signatures of high-magnitude 19th-century floods in *Quercus macrocarpa* tree rings along the Red River, Manitoba, Canada. *Geology*, 28, 899-902.
- STOFFEL M., 2006. A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards*, 39, 51-70.
- STOFFEL M., 2010. Magnitude-frequency relationships of debris flows – a case study based on field surveys and tree-ring records. *Geomorphology*, 116: 67-76.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2009. What tree rings can tell about earth-surface processes. Teaching the principles of dendrogeomorphology. *Geography Compass*, 3, 1013-1037.
- STOFFEL M., HITZ O.M., 2008. Snow avalanche and rockfall impacts leave different anatomical signatures in tree rings of *Larix decidua*. *Tree Physiology*, 28, 1713-1720.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 187-202.
- STOFFEL M., BENISTON M., 2006. On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, 33, L16404.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., BUTLER D.R., LUCKMAN B.H., 2010. Tree rings and natural hazards: A state-of-the-art. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 413 p.
- STOFFEL M., CONUS D., GRICHTING M.A., LIÈVRE I., MAÎTRE G., 2008. Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the central Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change*, 60, 228-240.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., HASSLER G.R., 2006a. Differentiating events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1424-1437.
- STOFFEL M., WEHRLI A., KÜHNE R., DORREN L.K.A., PERRET S., KIENHOLZ H., 2006b. Assessing the protective effect of mountain forests using a 3D model. *Forest Ecology and Management*, 225, 113-122.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., MONBARON M., PERRET S., 2005a. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgüfer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 89-106.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M., RAETZO H., GÄRTNER H.W., MONBARON M., 2005b. 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 387-395.
- STOFFEL M., SCHNEUWLY D., BOLLSCHWEILER M., LIÈVRE I., DELALOYE R., MYINT M., MONBARON M., 2005c. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68, 224-241.
- STRUNK H., 1997. Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31, 137–151.
- STRUNK H., 1991. Frequency distribution of debris flow in the Alps since the “Little Ice Age”. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Supplement 83, 71-81.
- SZYMCZAK S., BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., DIKAU R., 2010. Debris-flow activity and snow avalanches in a steep watershed of the Valais Alps (Switzerland): dendrogeomorphic event reconstruction and identification of triggers. *Geomorphology*, 116, 107-114.
- TIMELL T.E., 1986. *Compression wood in Gymnosperms*. Springer, Berlin.
- WESTING A.H., 1965. Formation and function of compression wood in gymnosperms II. *Botanical Reviews*, 34, 51-78.

RECONSTITUTION DENDROGÉOMORPHOLOGIQUE D'ÉVÉNEMENTS DE LAVE TORRENTIELLE À L'AIDE DE FEUILLUS BLESSÉS

DENDROGEOMORPHIC RECONSTRUCTION OF PAST DEBRIS-FLOW ACTIVITY USING INJURED BROAD-LEAVED TREES

ESTELLE ARBELLAY^{1,2}, MARKUS STOFFEL^{1,2}, MICHELLE BOLLSCHWEILER^{1,2}

¹ Laboratoire de Dendrogéomorphologie, Institut de Géologie, Université de Berne, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Berne.

² Département des Sciences de l'Environnement, Université de Genève, Chemin de Drize 7, CH-1227 Carouge-Genève.

Contact : estelle.arbellay@dendrolab.ch

RÉSUMÉ

Les cernes de croissance des conifères ont régulièrement été utilisés durant ces dernières décennies pour dater les événements de lave torrentielle. La reconstitution de l'activité des laves torrentielles n'a en revanche que très rarement été basée sur les anomalies de croissance des feuillus. Par conséquent, cette étude vise à dater les événements de lave torrentielle à partir des cernes de croissance des feuillus et à déterminer la valeur des feuillus pour les recherches en dendrogéomorphologie. Les résultats proviennent de l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench), du bouleau blanc et bouleau pubescent (*Betula pendula* Roth et *Betula pubescens* Ehrh.), du tremble (*Populus tremula* L.), du peuplier blanc, peuplier noir et peuplier grisard (*Populus alba* L., *Populus nigra* L. et *Populus x canescens* (Ait.) Sm.), du saule Marsault (*Salix caprea* L.) et du sureau noir (*Sambucus nigra* L.) blessés par l'activité des laves torrentielles à l'Illgraben (Valais, Alpes suisses). L'analyse des cernes de croissance de 315 échantillons extraits de 154 feuillus blessés a permis la reconstitution de 14 événements de lave torrentielle entre 1965 et 2007. Les données d'archives ont révélé que les laves torrentielles sont très fréquentes à l'Illgraben. Elles n'ont toutefois que très rarement quitté le chenal durant la période 1965-2007. En outre, l'analyse de la distribution spatiale des arbres perturbés a permis d'identifier six chemins de propagation des laves torrentielles et de déterminer ainsi les lieux de débordement préférentiels des événements. Les résultats de cette étude démontrent le potentiel élevé des feuillus pour les recherches en dendrogéomorphologie.

MOTS-CLÉS : DENDROGEOMORPHOLOGIE, LAVE TORRENTIELLE, FEUILLU, ALPES SUISSES.

ABSTRACT

Tree-ring records from conifers have been regularly used over the last few decades to date debris-flow events. The reconstruction of past debris-flow activity was, in contrast, only very rarely based on growth anomalies in broad-leaved trees. Consequently, this study aimed at dating the occurrence of former debris flows from growth series of broad-leaved trees and at determining their suitability for dendrogeomorphic research. Results were obtained from gray alder (*Alnus incana* (L.) Moench), silver birch and pubescent birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.), aspen (*Populus tremula* L.), white poplar, black poplar and gray poplar (*Populus alba* L., *Populus nigra* L. and *Populus x canescens* (Ait.) Sm.), goat willow (*Salix caprea* L.) and black elder (*Sambucus nigra* L.) injured by debris-flow activity at Illgraben (Valais, Swiss Alps). Tree-ring analysis of 315 samples from 154 injured broad-leaved trees allowed the reconstruction of 14 debris-flow events between AD 1965 and 2007. These events were compared to archival records on debris-flow activity at Illgraben. It appears that debris flows are very common at Illgraben, but only very rarely left the channel over the period AD 1965-2007. Furthermore, analysis of the spatial distribution of disturbed trees contributed to the identification of six patterns of debris-flow routing and led to the determination of preferential breakout locations of events. The results of this study demonstrate the high potential of broad-leaved trees for dendrogeomorphic research.

KEYWORDS: DENDROGEOMORPHOLOGY, DEBRIS FLOW, BROAD-LEAVED TREE, SWISS ALPS.

INTRODUCTION

Les laves torrentielles représentent un danger naturel majeur dans la plupart des régions de montagne du monde. Elles mettent en danger la sécurité des personnes et nuisent à leurs biens. La vitesse d'écoulement élevée et la faible prévisibilité temporelle des laves torrentielles en font un des types de glissement de terrain les plus dangereux (Jakob et Hungr, 2005). Elles se produisent dans de nombreuses régions des Alpes, ce qui nécessite davantage de mesures de mitigation. Par exemple, la réglementation fédérale suisse demande aux autorités cantonales d'établir des cartes de danger, qui aident à l'aménagement du territoire et à la conception de mesures de protection (Raetzo *et al.*, 2002). Selon cette perspective, reconstituer l'activité des laves torrentielles de manière spatio-temporelle est essentiel afin d'évaluer ce phénomène. Or, les données d'archives manquent considérablement car les informations sur les événements de lave torrentielle sont rares ou inexistantes.

La dendrogéomorphologie permet de reconstituer l'activité géomorphologique à partir des informations préservées dans les cernes de croissance des arbres (Alestalo, 1971 ; Stoffel et Bollschweiler, 2008), d'où la possibilité de compléter les archives. Dans les Alpes suisses, plusieurs cônes de déjection formés par des laves torrentielles ont été analysés avec cette méthode (Baumann et Kaiser, 1999 ; Bollschweiler et Stoffel, 2007). Les recherches en dendrogéomorphologie sur les laves torrentielles ont visé à dater les événements et à déterminer leur fréquence et l'extension spatiale des coulées (Bollschweiler *et al.*, 2007). D'autres

recherches dans ce domaine ont comparé les événements de lave torrentielle avec les données d'archives sur les inondations des rivières voisines (Stoffel *et al.*, 2005b) ou ont évalué les impacts possibles du réchauffement climatique sur la fréquence ou la magnitude des événements (Stoffel *et al.*, 2008b). Les précédentes reconstitutions dendrogéomorphologiques de l'activité des laves torrentielles ont presque exclusivement été réalisées avec des conifères. Les feuillus ont occasionnellement été utilisés pour compléter les données obtenues avec les conifères (Kaczka et Morin, 2006 ; Szymczak *et al.*, 2010). Ils n'ont toutefois jamais fait l'objet d'études approfondies. En effet, les conifères sont les arbres dominants dans les régions de montagne où se produisent les laves torrentielles. De plus, les conifères atteignent généralement un âge plus élevé et leur bois présente une structure plus simple, ce qui facilite l'analyse des cernes de croissance.

L'objectif principal de cette étude est de dater les événements de lave torrentielle par l'analyse de feuillus blessés. Hupp *et al.* (1987) et Strunk (1991) ont démontré l'intérêt d'étudier les blessures pour la reconstitution des événements de lave torrentielle. Cette étude souhaite également déterminer la valeur des feuillus pour les recherches en dendrogéomorphologie. Les résultats proviennent de neuf espèces de feuillus. Stoffel *et al.* (2008a) ont travaillé sur les conifères (*Pinus sylvestris* L.) et les événements affectant le cône de l'Illgraben alors que nous avons examiné les feuillus se trouvant sur les basses terrasses bordant le chenal actuel de l'Illgraben.

I - RÉGION D'ÉTUDE

L'Illgraben (Valais, Alpes suisses, 46°18'N/7°38'E) est considéré comme l'un des torrents les plus actifs des Alpes avec plusieurs événements de lave torrentielle par année (Rickenmann *et al.*, 2001). Il est situé sur la rive gauche de la vallée du Rhône en face de la ville de Leuk (Figure 1A). Le bassin de réception de 10,5 km² s'étend de l'Illhorn (2717 m) jusqu'au sommet du cône de l'Illgraben (860 m) (Geo7, 2000). Ce cirque impressionnant entre le Gorwetschgrat, l'Illhorn et le Meretschhorn s'est développé dans des calcaires, dolomies et quartzites du Permien et du Trias (Escher, 1988). Les parois rocheuses du bassin de réception sont presque dépourvues de végétation et ont une pente moyenne variant entre 40 et 50° (Geo7, 2000). Le matériel qui est remobilisé par les laves torrentielles s'accumule sur les pentes du bassin de réception. Les précipitations moyennes annuelles sont de 700 mm dans la partie inférieure du bassin de réception et de 1700 mm dans la partie supérieure (FOWG, 1999). Les orages violents ont surtout lieu en été. La

partie nord du bassin de réception n'est pas sujette à l'activité des laves torrentielles contrairement à la partie sud où l'érosion des pentes du bassin de réception fournit passablement de matériel pour les laves torrentielles (Hürlimann *et al.*, 2003).

Le cône de l'Illgraben a un rayon de 2 km, une surface de 6,6 km² et une pente moyenne de 10,2°. Il s'étend du sommet du cône (860 m) jusqu'à la confluence de l'Illgraben avec le Rhône (610 m) (Geo7, 2000). La partie est du cône inclut des bocages, le village de Susten et le hameau de Pletschen. La partie ouest, quant à elle, est recouverte par la vaste forêt de conifères (*Pinus sylvestris* L.) de Finges. Les feuillus se trouvent principalement sur les basses terrasses bordant le chenal actuel de l'Illgraben et forment des bandes étroites et discontinues de végétation riveraine essentiellement composée par l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench). Le bouleau blanc et bouleau pubescent (*Betula pendula* Roth et *Betula pubescens* Ehrh.), le tremble (*Populus tremula* L.),

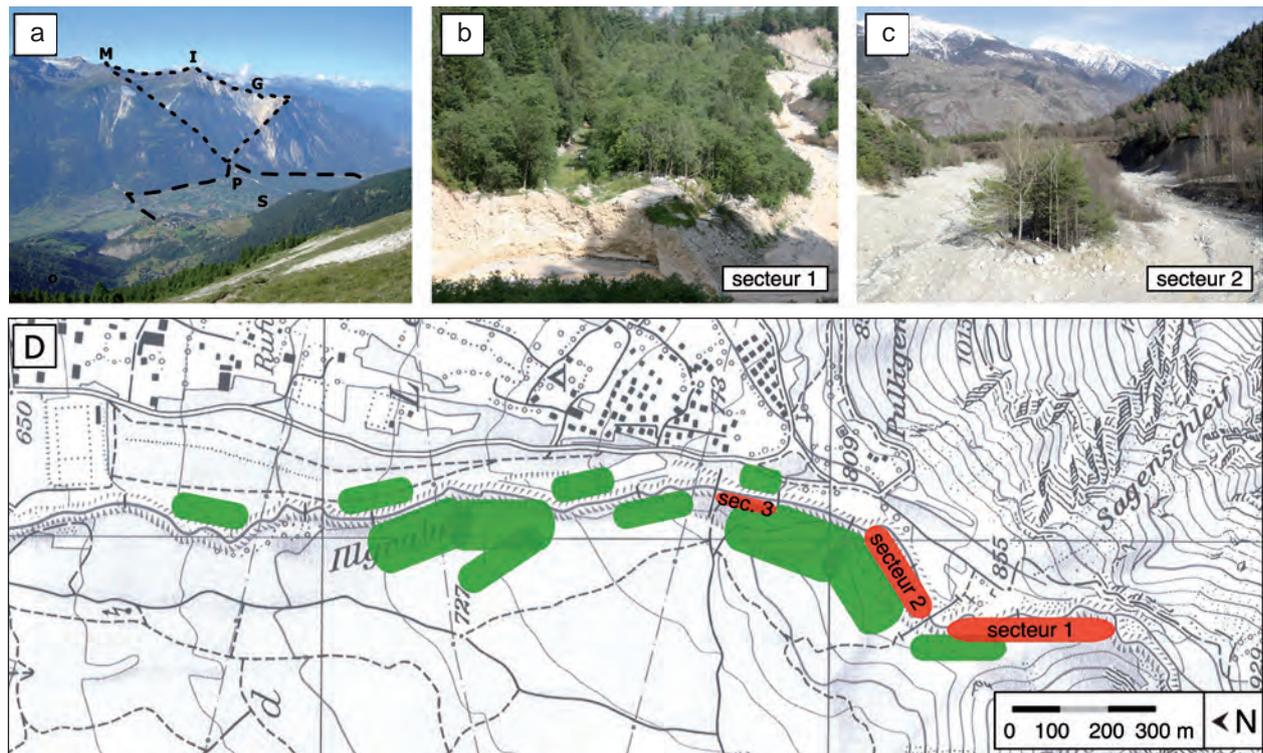


Figure 1 - (a) Le bassin de réception de l'illgraben est compris entre le Gorwetschgrat (G), l'illhorn (I) et le Meretschihorn (M). Le village de Susten (S) et le hameau de Pletschen (P) sont également indiqués. Une ligne en pointillés et une ligne en tiretés délimitent respectivement le bassin de réception et le cône de déjection formé par les laves torrentielles. (b) Terrasse du secteur 1 et coude formé par le chenal à 890 m d'altitude. (c) Ile de végétation du secteur 2 et terrasses d'érosion adjacentes. (d) Le travail de terrain de cette étude a été mené dans trois secteurs de végétation riveraine (en rouge) situés sur les basses terrasses bordant le chenal de l'illgraben. Pour comparaison, les zones à *Pinus sylvestris* L. (en vert) échantillonnées sur le cône de l'illgraben par Stoffel et al. (2008a) sont également localisées (fond de carte © Swisstopo).

le peuplier blanc, peuplier noir et peuplier grisard (*Populus alba* L., *Populus nigra* L. et *Populus x canescens* (Ait.) Sm.), le saule Marsault (*Salix caprea* L.) et le sureau noir (*Sambucus nigra* L.) complètent cette végétation riveraine.

Les données d'archives sur les événements de lave torrentielle à l'illgraben proviennent de différentes sources (Geo7, 2000 ; T&C et WSL, 2005 ; Stoffel et al., 2008a). Elles couvrent plus de 200 ans et font état de 15 événements qui ont affecté d'importantes parties du cône entre 1793 et 2005 (Stoffel et al., 2008a). Le 26 mars 1961, un écoulement a mobilisé une quantité considérable de matériel ($\pm 5 \times 10^6$ m³) dans la partie nord du bassin de réception et a augmenté la fréquence des laves torrentielles de manière significative durant les années suivantes (Geo7, 2000). Un barrage de rétention a donc été édifié dans la zone source des laves torrentielles et des barrages de contrôle ont été construits dans le chenal (Hürlimann et al., 2003). Ces contre-mesures ont contribué à réduire l'activité des laves torrentielles dans les années 1970. Cependant, au début des années 1980, le barrage de rétention était complètement rempli et la fréquence des laves tor-

rentielles a augmenté durant ces 20 dernières années (Hürlimann et al., 2003). Les données d'archives sur l'activité des laves torrentielles à l'illgraben étaient plutôt lacunaires avant qu'une station d'observation ait été installée en 2000 dans la partie inférieure du chenal (Rickenmann et al., 2001). Depuis, il a été possible de documenter et d'analyser en détail une quarantaine d'événements de lave torrentielle entre 2000 et 2008 (C. Graf, comm. pers., 2008). Par ailleurs, plusieurs projets ont été développés afin d'étudier les processus d'érosion dans la zone source des laves torrentielles et dans le chenal (McArdell et al., 2007 ; Badoux et al., 2009 ; Schlunegger et al., 2009).

L'illgraben a formé une vallée d'environ 100 m de largeur incisée à la surface du cône. Le chenal actuel de l'illgraben est incisé dans cette large vallée jusqu'à 20 m sous la surface du cône. Cette étude s'est concentrée sur trois secteurs situés au sommet du cône sur les basses terrasses bordant le chenal actuel de l'illgraben (Figure 1D). Le secteur 1 (Figure 1B) est une terrasse longue de 350 m et s'étendant du coude formé par le chenal à 890 m d'altitude jusqu'au pont bhoutanais (840 m). Le secteur 2 (Figure 1C) s'étend du pont

bhoutanais jusqu'au barrage de contrôle situé à 820 m d'altitude et inclut trois terrasses d'érosion formées par l'activité actuelle et passée de l'Ilgraben. L'érosion a créé une île de végétation (175 x 50 m) entourée par le chenal actuel au nord et par un chenal abandonné

au sud. Le secteur 3 est une terrasse longue de 125 m et située à environ 780 m d'altitude à proximité du hameau de Pletschen. La largeur du chenal actuel dans les trois secteurs étudiés est de 10 à 20 m tandis que sa profondeur est de 2 à 4 m.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1 - Cartographie géomorphologique

Le travail de terrain a débuté par la cartographie (échelle 1:1000) des formes liées à l'activité des laves torrentielles telles que les levées, lobes et anciens chenaux. La végétation riveraine étant relativement dense le long du chenal, la cartographie géomorphologique n'a pas été réalisée à l'aide d'un GPS mais au moyen d'un ruban métrique, d'un inclinomètre et d'une boussole.

2 - Stratégie d'échantillonnage

Sur la base des cartes géomorphologiques et d'une inspection de la surface des troncs, 154 feuillus blessés ont été sélectionnés. Seules les blessures qui étaient orientées dans la direction d'écoulement présumée des événements de lave torrentielle ont été considérées. En

effet, les blessures qui ne répondaient pas à ce critère pouvaient avoir été causées par des bris de branches, des chutes de pierres ou des activités anthropiques. Nous avons évité d'échantillonner les arbres qui étaient devenus complètement pourris suite aux blessures car la lisibilité des cernes n'était plus garantie. Un coin par blessure a été extrait à l'aide d'une scie ou d'une tronçonneuse selon la dimension du bourrelet cicatriciel. Le côté supérieur du coin, utilisé pour l'analyse des cernes de croissance, a été coupé horizontalement à travers le bourrelet de tissu calleux tandis que le côté inférieur a été coupé obliquement (Figure 2A). Par ailleurs, une carotte par arbre a été extraite à l'aide d'une tarière à la base du côté indemne du tronc. Nous avons préféré les disques aux coins et carottes chaque fois que le diamètre de l'arbre permettait simplement d'utiliser la scie. Au total, 104 carottes, 118 coins et 93 disques ont été échantillonnés. Les informations relatives à chaque arbre incluaient son espèce, sa position

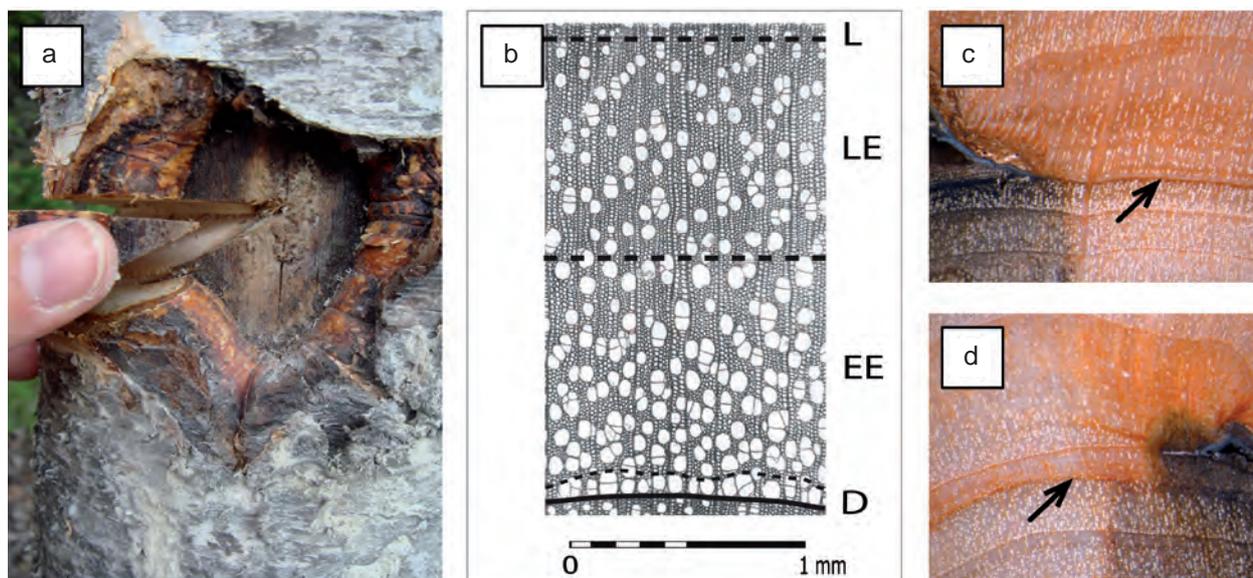


Figure 2 - (a) Coin coupé à travers le bourrelet cicatriciel d'un bouleau blanc (*Betula pendula* Roth). (b) Les cernes de croissance des espèces à pores diffus sont faits presque entièrement de bois précoce subdivisé en early earlywood (EE) et late earlywood (LE). Le bois tardif ou latewood (L) est confiné dans une zone terminale très étroite. A noter que les cellules formées durant les premiers jours de la période de croissance sont attribuées à la période de dormance (D) (inspiré de Stoffel et al., 2005 a). (c+d) Exemples de blessures causées par des laves torrentielles sur l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench). Les flèches indiquent la position radiale de la blessure à l'intérieur du cerne de croissance. (c) Blessure en early earlywood. (d) Blessure en late earlywood.

dans ou sur les dépôts de lave torrentielle, sa hauteur et sa circonférence basale, l'emplacement et les dimensions des blessures, et l'emplacement des échantillons extraits du tronc.

3 - Datation des événements de lave torrentielle

En laboratoire, les échantillons ont été analysés et les données traitées selon les procédures standard décrites par Stoffel et Bollschweiler (2008). Le travail effectué comprenait le ponçage de la surface des échantillons, le comptage des cernes de croissance et la mesure de la largeur des cernes à l'aide d'une table de mesure LINTAB connectée à un microscope Leica et au logiciel TSAP-Win Scientific 4.63 (Rinntech, 2010). La largeur des cernes a été mesurée sur le côté opposé à la blessure. La datation des événements de lave torrentielle a été basée sur une analyse dendrogéomorphologique des blessures et des changements abrupts de croissance observés sur les échantillons. Nous n'avons pas examiné le bois de tension parce que les arbres qui composent une végétation riveraine ont tendance à croître en direction de la lumière. L'inclinaison de leur tronc est donc essentiellement liée à des facteurs écologiques et non à des facteurs géomorphologiques.

Les coins et les disques ont été utilisés pour dater les blessures à l'année en comptant le nombre de cernes de croissance formés après l'événement et à la saison en observant la position radiale de la blessure à l'intérieur du cerne de croissance (Alestalo, 1971 ; Schweingruber, 2001). Comme illustré dans la Figure 2B, les cernes de croissance ont été subdivisés en *early earlywood* (EE), qui commence à la fin du printemps ; *late earlywood* (LE), qui cesse à la fin de l'été ; et

latewood (L), qui est formé au début de l'automne. Les blessures causées par des événements de lave torrentielle ayant eu lieu hors ou durant les premiers jours de la période de croissance ont été attribuées à la période de dormance (D) (Stoffel et al., 2005a). Nous avons considéré les blessures d'un arbre qui étaient datées de la même année et de la même saison comme une seule et unique blessure.

Les cernes de croissance des carottes et des disques ont été mesurés pour produire des courbes de croissance que nous avons analysées visuellement afin de déterminer le début des changements abrupts de croissance (Schweingruber, 2001). Nous avons pris en compte uniquement les changements abrupts de croissance qui duraient au moins deux ans. Ceux-ci ont ensuite été classés en trois catégories selon le degré et la persistance de la diminution ou de l'augmentation de croissance. Une réaction forte était définie lorsque la largeur du cerne était au moins 66,6% plus petite ou au moins 300% plus grande que celle du cerne précédent. Une réaction faible était définie lorsque la largeur du cerne était moins de 50% plus petite ou moins de 200% plus grande. Une réponse intermédiaire se situait entre ces deux catégories.

4 - Identification des chemins de propagation des laves torrentielles

La distance parcourue, l'extension latérale ainsi que les lieux de débordement préférentiels des événements de lave torrentielle ont été examinés dans les secteurs 1 et 2 par l'analyse de la distribution spatiale des arbres perturbés durant une année d'événement spécifique. Le nombre d'arbres échantillonnés dans le secteur 3 était trop petit pour permettre cette analyse.

III - RÉSULTATS

1 - Caractéristiques des arbres et perturbations de croissance

Les résultats ont été obtenus à partir de 315 échantillons provenant de neuf espèces de feuillus (Figure 3). L'âge moyen des 154 arbres sélectionnés était de 27,1 ans ($\sigma = 13,2$ ans) à la hauteur d'échan-

tillonnage. Le nombre de leurs cernes de croissance allait de 7 (2001) à 91 (1917). Leur hauteur allait de 2,5 m à 23 m et leur circonférence basale de 18 cm à 150 cm. Il y a une concentration d'arbres plus vieux, à 50 m du chenal, à environ 850 m d'altitude dans la partie nord du secteur 1. L'âge moyen de ces arbres est de 42 ans ($\sigma = 5,2$ ans) à la hauteur d'échantillonnage

| Espèce | Nombre absolu | % |
|---|---------------|-----|
| <i>Alnus incana</i> (L.) Moench | 80 | 52 |
| <i>Betula pendula</i> Roth, <i>Betula pubescens</i> Ehrh. | 28 | 18 |
| <i>Populus alba</i> L., <i>Populus tremula</i> L., <i>Populus nigra</i> L., <i>Populus x canescens</i> (Ait.) Sm. | 29 | 19 |
| <i>Salix caprea</i> L. | 15 | 10 |
| <i>Sambucus nigra</i> L. | 2 | 1 |
| TOTAL | 154 | 100 |

Figure 3 - Vue d'ensemble des neuf espèces de feuillus échantillonnées.

et le nombre de leurs cernes de croissance va de 29 (1979) à 50 (1958). L'analyse des cernes de croissance des 315 échantillons a conduit à l'identification de 444 perturbations de croissance. Les événements de lave torrentielle ont été détectés sur les échantillons à l'aide des blessures (41 %) et des diminutions (40 %) ou augmentations (19 %) abruptes de croissance.

2 - Événements de lave torrentielle et leur fréquence

L'analyse des perturbations de croissance a permis la reconstitution de 14 événements de lave torrentielle entre 1965 et 2007. Trois années d'événement (1995, 2002, 2005) ont vu les laves torrentielles affecter plus de 30 % des arbres qui étaient plus grands que la hauteur d'échantillonnage au moment de l'événement. Les autres années d'événement (1965, 1969, 1973, 1981, 1982, 1988, 1991, 1997, 1998, 1999) ont été reconstituées à partir d'un nombre plus restreint d'informations mais incluaient néanmoins de fortes perturbations de croissance. Il est donc concevable que les laves torrentielles aient également quitté le chenal de l'Illgraben durant ces années. La Figure 4 recense 352 perturbations de croissance et détaille le nombre de blessures et de changements abrupts de croissance des 14 événements de lave torrentielle. Nous pouvons constater que deux événements ont eu lieu durant la même année mais à des saisons différentes. En effet, un événement de *early earlywood* (EE) a été suivi par un événement de *late earlywood* (LE) en 1995. Il apparaît aussi dans la Figure 4 que certains événements ont été reconstitués entièrement à partir de diminutions abruptes de croissance et d'autres principalement à partir de blessures. De plus, il est intéressant de noter la relative rareté des blessures par rapport

aux changements abrupts de croissance. La plupart des blessures ont été causées par seulement deux événements (1995 b et 2005) et ont été datées du *early earlywood* (71 %). Les autres blessures se rapportaient au *late earlywood* (26 %) et au *latewood* (3 %). En ce qui concerne les changements abrupts de croissance, les diminutions (73 %) sont plus fréquentes que les augmentations (27 %). Toutefois, une augmentation abrupte de croissance a été observée sur de nombreux échantillons en 2005.

3 - Chemins de propagation des laves torrentielles sur les basses terrasses

L'analyse de la distribution spatiale des arbres perturbés a permis l'identification de six chemins de propagation des laves torrentielles, à savoir trois dans le secteur 1 et trois dans le secteur 2.

a - Chemins de propagation des laves torrentielles dans le secteur 1

Le chemin de propagation A est illustré par un événement de lave torrentielle daté du *early earlywood* (EE) de 1995 et quittant le chenal de l'Illgraben au coude formé à 890 m d'altitude (Figure 5A). L'événement se caractérise par une distance parcourue totale de 200 m et une extension latérale initiale de 20 m qui diminue en s'éloignant du lieu de débordement. Le chemin de propagation B, représenté par une lave torrentielle de 2002, montre deux lieux de débordement (Figure 5B). L'événement est apparemment sorti du chenal au coude et a parcouru la terrasse sur toute sa longueur (350 m). Il a également affecté la partie nord du secteur en quittant le chenal à environ 870 m d'altitude. Le chemin de propagation C (Figure 5C),

| Événement | Blessures | | | | Changements abrupts de croissance | | TOTAL |
|--------------|-----------|-----------|-----------|---|-----------------------------------|-----------|------------|
| | D | EE | LE | L | DAC | AAC | |
| 1965 | | | | | 5 | | 5 |
| 1969 | | | | | 6 | | 6 |
| 1973 | | | | | 5 | | 5 |
| 1981 | | | | | 6 | | 6 |
| 1982 | | | | | 4 | 1 | 5 |
| 1988 | | | | | 10 | | 10 |
| 1991 | | | | | 11 | 2 | 13 |
| 1995a | | 17 | | | | | 17 |
| 1995b | | | 36 | | 5 | 2 | 43 |
| 1997 | | | 6 | | 11 | 1 | 18 |
| 1998 | | | | 4 | | | 4 |
| 1999 | | | | | 21 | 2 | 23 |
| 2002 | | | | | 47 | | 47 |
| 2005 | | 98 | | | 9 | 43 | 150 |
| TOTAL | | 115 | 42 | 4 | 140 | 51 | 352 |
| TOTAL | | 161 | | | 191 | | 352 |

Figure 4 - Vue d'ensemble du nombre de blessures et de changements abrupts de croissance des 14 événements de lave torrentielle. Les événements en gras sont relatifs aux trois années durant lesquelles les laves torrentielles ont affecté plus de 30 % des arbres qui étaient plus grands que la hauteur d'échantillonnage au moment de l'événement.

Abréviations :

D, dormance ;

EE, *early earlywood* ;

LE, *late earlywood* ;

L, *latewood* ;

DAC, diminution abrupte de croissance ;

AAC, augmentation abrupte de croissance.

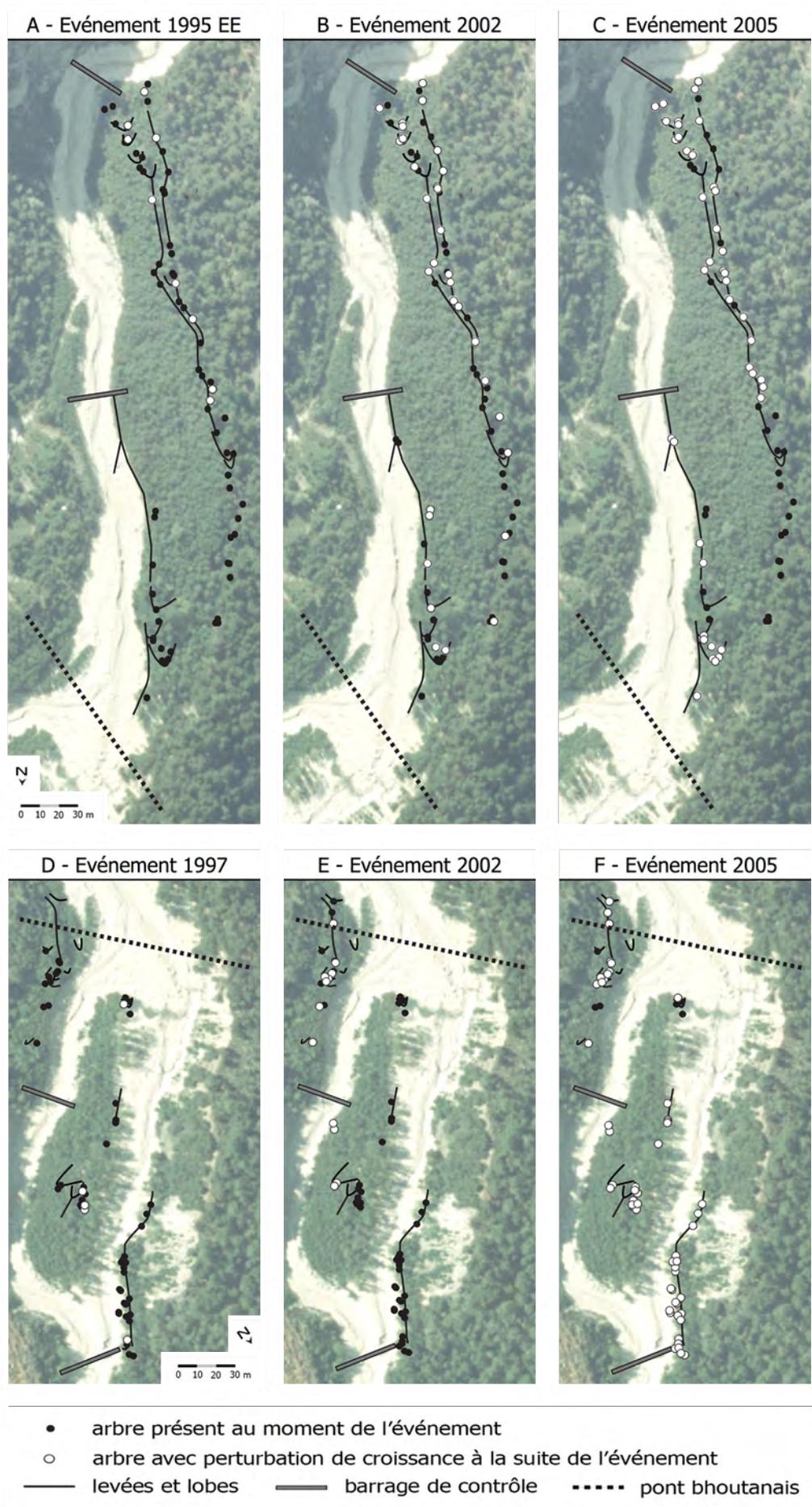


Figure 5 - Localisation des arbres montrant une perturbation de croissance dans le secteur 1 et dans le secteur 2 pour les événements de lave torrentielle choisis.

Chacune des parties de cette figure illustre un chemin de propagation différent. Pour de plus amples informations voir texte principal.

Abréviation:
 EE, early earlywood.

(swissimage © 2009 swisstopo - BA091713).

représenté par une lave torrentielle de 2005, est quelque peu similaire au chemin de propagation B. La différence est que l'événement a parcouru la terrasse sur la moitié de sa longueur comme dans le chemin de propagation A.

b - Chemins de propagation des laves torrentielles dans le secteur 2

Le chemin de propagation D correspond à une lave torrentielle de 1997 qui a emprunté le chenal actuel

de l'Illgraben et affecté les terrasses nord du secteur (Figure 5D). Le chemin de propagation E (Figure 5E) est relatif à la lave torrentielle de 2002 (Figure 5B) qui a soit quitté le chenal à environ 860 m d'altitude, soit emprunté le chenal abandonné et affecté les terrasses sud. Le chemin de propagation F (Figure 5F) est relatif à la lave torrentielle de 2005 (Figure 5C) et peut être décrit comme une combinaison des deux chemins de propagation précédents. L'événement a perturbé les arbres des terrasses nord et sud sur une distance respective de 200 et 130 m.

IV - DISCUSSION

Cette étude fait état de 14 événements de lave torrentielle entre 1965 et 2007. Il s'agit d'une fréquence minimale puisqu'elle considère uniquement les laves torrentielles qui ont quitté le chenal de l'Illgraben. Il est effectivement courant que des laves torrentielles de volume moyen, comme celles de fin juin 2000 et mi-mai 2003 (Geo7, 2000), restent à l'intérieur du chenal. Nous savons aussi que les laves torrentielles ont pu partiellement ou entièrement éliminer des parties de la forêt. Par ailleurs, les arbres ont pu contenir des blessures cachées qui n'ont pas pu être identifiées sur le terrain et intégrées dans la reconstitution dendrogéomorphologique. Toutefois, nous pensons que la fréquence mentionnée dans cette étude inclut la plupart des événements de lave torrentielle qui ont perturbé les arbres des basses terrasses durant la période 1965-2007. En effet, l'analyse des échantillons n'a révélé que 10% de blessures cachées, contre 90% de blessures restées visibles à la surface du tronc. Avoir échantillonné uniquement des arbres présentant des blessures visibles à la surface du tronc ne semble pas avoir influencé les résultats de cette étude. En outre, les arbres à écorce mince et lisse comme l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench) connaissent une cicatrisation des blessures plus lente que les arbres à écorce épaisse et rugueuse (Stoffel et Perret, 2006).

Les 14 événements de lave torrentielle ont été comparés avec les données d'archives sur l'activité des laves torrentielles à l'Illgraben (Geo7, 2000; T&C et WSL, 2005). La Figure 6 présente les cinq événements (1991, 1997, 1999, 2002, 2005) pour lesquels les résultats de cette étude et les données d'archives correspondent. Les autres événements (1965, 1969, 1973, 1981, 1982, 1988, 1995a, 1995b, 1998) datés à partir des cernes de croissance des feuillus viennent donc compléter les archives sur l'activité des laves torrentielles. En nous basant sur l'analyse dendrogéomorphologique des blessures, nous pouvons dire que la lave torrentielle inscrite dans les archives en début octobre 1995 (Geo7, 2000) a été précédée par deux autres événements ayant eu lieu à différents moments durant l'été. A l'Illgraben, les événements de lave torrentielle ont lieu de début mai à fin octobre (Geo7, 2000; T&C et WSL, 2005), intervalle qui comprend la période de croissance des arbres. Les laves torrentielles peuvent donc être datées si elles quittent le chenal et perturbent des arbres. La plupart des événements ont été détectés sur les échantillons à l'aide des changements abrupts de croissance en raison du matériel fin qui est généralement transporté par les laves torrentielles à l'Illgraben. Les arbres ne sont blessés que par les laves torrentielles qui transportent de gros rochers.

| Événement | Volume (m ³) | Saisonnalité | Source |
|-----------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|
| 12.07.1991 | 75 000-250 000 | inconnue | Geo7, 2000 |
| 21.08.1997 | 25 000-75 000 | fin été (LE) | Geo7, 2000 |
| 16.08.1999 | 75 000-250 000 | inconnue | Geo7, 2000 |
| 10.08.2002 | 71 000 | inconnue | T&C et WSL, 2005 |
| 28.05.2005 | 140 000 | fin printemps (EE) | C. Graf, comm. pers., 2008 |
| Max. 2000-2005 | 140 000 | | |
| Min. 2000-2005 | 3000 | | |
| Moyen 2000-2005 | 32 667 | | |

Figure 6 - Événements de lave torrentielle pour lesquels les résultats de cette étude et les données d'archives coïncident. Les événements de 1991, 1999 et 2002 n'ont pas pu être datés à la saison car ils ont été inférés exclusivement à partir de changements abrupts de croissance. Les volumes maximum, minimum et moyen sont basés sur les 24 événements de lave torrentielle qui ont été répertoriés durant la période 2000-2005.

Le débordement et l'extension des laves torrentielles sur les basses terrasses dépendent en partie de la capacité du chenal au moment des événements. Le matériel déposé par de précédentes laves torrentielles ou par des glissements de terrain a pu rehausser le lit du chenal ou le bloquer par endroits. Cela peut expliquer comment des événements de petit volume ($\leq 75\,000\text{ m}^3$), comme ceux de 1997 et 2002 (Figure 6), ont réussi à quitter le chenal. Nous pensons également que la vitesse d'écoulement des laves torrentielles peut influencer leur chemin de propagation sur les basses terrasses. Par exemple, l'événement de 2005 est sorti du chenal au coude du secteur 1 malgré la hauteur relativement élevée de la terrasse à cet endroit. De plus, l'immense lave torrentielle ($\pm 500\,000\text{ m}^3$) du début juin 1961 (Hürlimann *et al.*, 2003) est certainement sortie du chenal à ce même endroit. Cet événement n'a pas pu être daté à partir des cernes de croissance des feuillus parce que la lave torrentielle a partiellement éliminé la forêt sur son passage. Depuis, le site a été recolonisé par la végétation et correspond actuellement à la concentration d'arbres plus vieux dans la partie nord du secteur 1. Nous sommes aussi d'avis que certains barrages de contrôle agissent comme des rampes qui

propulsent le matériel en hauteur. Des dépôts de lave torrentielle ont été observés sur les basses terrasses en aval des barrages de contrôle dans les secteurs 1 et 3.

Les données d'archives sur l'activité des laves torrentielles montrent que celles-ci sont très fréquentes à l'Illgraben (Geo7, 2000 ; T&C et WSL, 2005). Elles n'ont toutefois que très rarement quitté le chenal durant la période 1965-2007 et durant ces 200 dernières années (Stoffel *et al.*, 2008 a). En nous basant sur les observations de cette étude et sur le volume moyen des événements répertoriés (Figure 6), nous estimons à $50\,000\text{ m}^3$ la limite inférieure de volume pour que les laves torrentielles affectent les basses terrasses. Le seuil pour que les laves torrentielles atteignent la surface du cône est de $250\,000\text{ m}^3$ (Graf *et al.*, 2007) et concorde avec les résultats de cette étude. Néanmoins, des facteurs autres que le volume peuvent influencer le débordement des laves torrentielles sur les basses terrasses. Ce phénomène semble dépendre davantage du chenal que du volume des événements puisque même des laves torrentielles de petit volume ont quitté le chenal en 1997 et 2002. En plus de la capacité du chenal, nous pensons que la vitesse d'écoulement des laves torrentielles peut les avoir aidées à déborder sur les basses terrasses.

CONCLUSION

L'analyse dendrogéomorphologique des échantillons a permis la reconstitution de 14 événements de lave torrentielle entre 1965 et 2007. De plus, l'analyse de la distribution spatiale des arbres perturbés a contribué à identifier six chemins de propagation des laves torrentielles. Les lieux de débordement préférentiels des événements ont pu être déterminés. La distance parcourue et l'extension latérale des laves torrentielles ont pu être évaluées. Les feuillus se sont révélés une précieuse source d'informations sur les événements de lave torrentielle à l'Illgraben. C'est pourquoi ils devraient être davantage utilisés dans les reconstitutions dendrogéomorphologiques notamment parce qu'ils colonisent des zones riveraines dont les conifères

sont souvent absents. Bien que le jeune âge des arbres échantillonnés ait limité la reconstitution, les feuillus ont fourni un aperçu très détaillé de l'activité récente des laves torrentielles, de l'évolution du chenal et des chemins de propagation des laves torrentielles sur les basses terrasses. Les résultats suggèrent également que les reconstitutions dendrogéomorphologiques de l'activité des laves torrentielles sont plus exactes si les analyses sont réalisées avec des conifères et avec des feuillus et si les recherches sont menées sur la surface du cône et sur les basses terrasses proches du chenal. Les méthodes développées dans cette étude peuvent être appliquées à d'autres cônes de déjection formés par des laves torrentielles et colonisés par des feuillus.

Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier le Dr. Oliver Hitz pour son aide sur le terrain et en laboratoire. Ils remercient également Christoph Graf de l'Institut fédéral suisse de recherches WSL pour ses précieuses données sur les laves torrentielles à l'Illgraben. Nous sommes aussi reconnaissants envers le Service des Forêts et du Paysage (SFP) et le Service des Routes et des Cours d'Eau (SRCE) du canton du Valais pour avoir financé cette étude qui fait partie du projet RUFINE.

BIBLIOGRAPHIE

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-139.
- BADOUX A., GRAF C., RHYNER J., KUNTNER R., MCARDELL B.W., 2009. A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural Hazards*, 49(3), 517-539.
- BAUMANN F., KAISER K.F., 1999. The Muretta debris fan, eastern Swiss Alps: a 500-year debris flow chronology. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 31(2), 128-134.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., 2007. Debris flows on forested cones – reconstruction and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 207-218.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., EHMISCH M., MONBARON M., 2007. Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology*, 87, 337-351.
- ESCHER A., 1988. Structure de la nappe du Grand Saint-Bernard entre le Val de Bagnes et les Mischabel. Rapport géologique 7, Service hydrologique et géologique national: Bern.
- FOGW (Federal Office for Water and Geology), 1999. Hydrological atlas of Switzerland. Federal Office for Water and Geology, Biel.
- GEO7, 2000. Geomorphologische Analyse des Illgrabens. Rapport technique non publié, Geo7, Bern.
- GRAF C., BADOUX A., DUFOUR F., FRITSCHI B., MCARDELL B.W., RHYNER J., KUNTNER R., TEYSSEIRE P., NIGG U., 2007. Alarmsystem für murgangfähige Wildbäche - Beispiel Illgraben. *Wasser Energie Luft*, 99(2), 119-128.
- HUPP C.R., OSTERKAMP W.R., THORNTON J.L., 1987. Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1396B, 1-39.
- HÜRLIMANN M., RICKENMANN D., GRAF C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 161-175.
- JAKOB M., HUNGR O., 2005. Debris-flow hazards and related phenomena. Praxis. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, 739 p.
- KACZKA R.J., MORIN H., 2006. The dendrochronological records of debris flow activity in SE Quebec. *Proceedings TRACE 2006*. Tervuren, Belgium; 5, 233-239.
- MCARDELL B.W., BARTELT P., KOWALSKI J., 2007. Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. *Geophysical Research Letters*, 34, L07406, doi:10.1029/2006GL029183.
- RAETZO H., LATELTIN O., BOLLINGER D., TRIPET J.P., 2002. Hazard assessment in Switzerland – codes of practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 263-268.
- RICKENMANN D., HÜRLIMANN M., GRAF C., NÄF D., WEBER D., 2001. Murgang-Beobachtungsstationen in der Schweiz. *Wasser Energie Luft*, 93(1/2), 1-8.
- RINNTech, 2010. <http://www.rinntech.com/content/blogcategory/2/28/lang,english/> (site consulté le 4 janvier 2010).
- SCHLUNEGGER F., BADOUX A., MCARDELL B.W., GWERDER C., SCHNYDRIG D., RIEKE-ZAPP D., MOLNAR P., 2009. Limits of sediment transfer in an alpine debris-flow catchment, Illgraben, Switzerland. *Quaternary Science Reviews*, 28, 1097-1105, doi:10.1016/j.quascirev.2008.10.025.
- SCHWEINGRUBER F.H., 2001. Dendroökologische Holzanatomie. Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Haupt: Bern, Stuttgart, Wien, 472 p.
- STOFFEL M., PERRET S., 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia*, 24(1), 1-15.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 187-202.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., MONBARON M., PERRET S., 2005a. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 89-106.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M.A., RAETZO H., GÄRTNER H.W., MONBARON M., 2005b. 400 years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 387-395.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., LEUTWILER A., AEBY P., 2008a. Tree-ring reconstruction of debris-flow events leading to overbank sedimentation on the Illgraben cone (Valais Alps, Switzerland). *The Open Geology Journal*, 2, 36-47.
- STOFFEL M., CONUS D., GRICHTING M.A., LIÈVRE I., MAÎTRE G., 2008b. Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the central Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change*, 60, 222-234.
- STRUNK H., 1991. Frequency distribution of debris flows in the Alps since the Little Ice Age. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 83, 71-81.
- SZYMCZAK S., BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., DIKAU R., 2010. Debris-flow activity and snow avalanches in a steep watershed of the Valais Alps (Switzerland): dendrogeomorphic event reconstruction and identification of triggers. *Geomorphology*, 116, 107-114.
- T&C, WSL (Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage), 2005. Technischer Bericht Notfallkonzept Illgraben. PROGE Notfallkonzept Illgraben. T&C et WSL : Visp, Birmensdorf.

APPORT DE LA DENDROGÉOMORPHOLOGIE POUR LA RECONSTRUCTION SPATIO-TEMPORELLE DES AVALANCHES

L'EXEMPLE DU DÉPÔT AVALANCHEUX PIERRES JEAN JEANNE MASSIF DE L'OISANS, FRANCE

*CONTRIBUTION OF DENDROGEOMORPHOLOGY FOR SPATIO-TEMPORAL RECONSTRUCTION
OF SNOW AVALANCHES: A CASE STUDY ON PIERRES JEAN JEANNE AVALANCHE TALUS
MASSIF DE L'OISANS, FRANCE*

CHRISTOPHE CORONA¹, GEORGES ROVERA², JÉRÔME LOPEZ SAEZ¹,
MARKUS STOFFEL³, PASCAL PERFETTINI¹

¹ Cemagref UR EMGR, 2 rue de la papeterie, B.P. 76, F 38402 Saint Martin d'Hères cedex.

² Institut de Géographie Alpine, Laboratoire Politiques publiques, Action Politique, Territoires (PACTE)
UMR 5194 du CNRS, Université Joseph Fourier, 14 bis avenue Marie Reynoard, F 38100 Grenoble.

³ Laboratory of Dendrogeomorphology, Institute of Geological Sciences, University of Berne, Baltzerstrasse 1+3, CH 3012, Berne.

Contact : christophe.corona@gmail.com

RÉSUMÉ

*Les avalanches constituent l'un des principaux aléas naturels pour les hommes et les activités humaines dans les pays alpins. La prédétermination de l'aléa avalancheux, en termes de probabilité d'occurrence et d'intensité, s'appuie sur des chroniques d'événements passés, souvent lacunaires et imprécises sur le plan spatial. La communication présente les principaux apports de la dendrogeomorphologie pour la détermination de la période de retour et la spatialisation de l'aléa. L'étude a été réalisée sur le dépôt boisé Pierres Jean Jeanne (Massif de l'Oisans, France). Un total de 232 mélèzes (*Larix decidua* Mill.) endommagés par les avalanches ont été échantillonnés et 901 perturbations de croissance ont été identifiées. Vingt événements avalancheux de forte intensité ont pu être reconstitués entre 1919 et 1994. La période de retour de l'aléa avalancheux a ainsi été évaluée en moyenne à 3 ans. La distance d'arrêt semble avoir peu variée au cours du temps mais l'extension latérale est très hétérogène et les zones situées en dehors de l'emprise de la carte de localisation des phénomènes avalancheux sont fréquemment atteintes. Sur le plan temporel, la distribution décennale des événements avalancheux apparaît relativement homogène avec cependant des lacunes entre 1951-1961 et depuis 1994.*

MOTS CLÉ : AVALANCHES, OISANS, DENDROGÉOMORPHOLOGIE, PÉRIODE DE RETOUR, DISTANCE D'ARRÊT, ZONAGE.

ABSTRACT

*Snow avalanches are a major threat in many parts of the Alps. Nonetheless, the spatial behavior of past avalanche activity and the analysis of areas affected during particular events remain often imprecise. It was therefore the purpose of this study to reconstruct spatio-temporal patterns of past avalanche activity on a forested avalanche talus in the French Alps (Pierres Jean Jeanne talus, Massif de l'Oisans, France). A total of 232 trees (*Larix decidua* Mill.) with clear signs of snow wasting events was analyzed and growth disturbances (GD) related to avalanche activity assessed, such as tangential rows of traumatic resin ducts, the onset of reaction wood or abrupt growth suppression or release. In total, 901 GD were identified in the tree-ring samples, indicating that 20 different high-magnitude avalanches occurred between AD 1919 and 1994. The mean return period of snow avalanches was 3 years. The longitudinal extent showed minor variations through time while the lateral extent exhibited large variations. The distribution of avalanche years seems to be quite homogeneous in time with a gap between 1951 and 1961 and since 1994.*

KEYWORDS: AVALANCHES, OISANS, DENDROGEOMORPHOLOGY, RETURN PERIOD, LONGITUDINAL EXTENT, ZONATION.

INTRODUCTION

Selon le rapport du retour d'expérience de l'avalanche catastrophique de Montror (commune de Chamonix, Alpes du Nord, France) du 7 février 1999 (Glass *et al.*, 2000), la meilleure appréciation de la période de retour d'une avalanche est certainement réalisée à travers l'étude de ses manifestations historiques. De fait, la France possède une base de données exceptionnelle : l'enquête permanente des avalanches (EPA) assure le suivi de 4200 sites, pour certains depuis le début du XX^e siècle, répartis dans 11 départements (Jamard et Garcia, 2002). Cependant, cette documentation historique est souvent imprécise ou lacunaire. Dans de nombreux secteurs, elle est inexistante. Cette absence d'information est problématique dans le contexte actuel de déprise agro-sylvo-pastorale et de réchauffement climatique (Didier et Brun, 1998) où l'enfrichement constaté de nombreux couloirs peut laisser croire à une diminution du risque avalancheux. Dans les couloirs boisés, la dendrogéomorphologie peut apporter une réponse en permettant de reconstituer une chronologie des avalanches majeures (Burrows et Burrows, 1976). Des reconstitutions ont

été réalisées dans les Montagnes Rocheuses (Reardon *et al.*, 2008), dans les Alpes italiennes (Bezzi *et al.*, 2003) et suisses (Stoffel *et al.*, 2006), dans les monts Chic-Chocs (Boucher *et al.*, 2004) et dans les Pyrénées espagnoles (Muntan *et al.*, 2004). A ce jour, nous n'avons recensé aucune étude comparable dans les Alpes françaises. Le dépôt d'avalanches retenu pour cette recherche est situé dans la vallée de la Romanche (massif de l'Oisans, Hautes-Alpes, France) au lieu-dit Pierres Jean Jeanne (45°03' N, 06°25' E, Figure 1). Ce site offre un triple intérêt :

- une bonne documentation historique ;
 - un peuplement arboré dense (*Larix decidua* Mill.) assez ancien, avec des arbres présentant des morphologies variées et portant les traces d'une activité avalancheuse, utilisables pour une reconstitution ;
 - une colonisation ligneuse au cours du XX^e siècle.
- Deux objectifs sont fixés à cette étude : mettre au point et valider une méthodologie permettant non seulement de reconstituer mais également de spatialiser les avalanches majeures et leur période de retour sur un site donné.

I - METHODOLOGIE

1 - Présentation du dépôt avalancheux Pierres Jean Jeanne

Le versant « Pierres Jean Jeanne » est alimenté par une zone de départ située au-dessus de 2500 m d'altitude et constituée d'une partie du glacier de la Girose. Les chutes de séracs apériodiques qui influencent le fonctionnement avalancheux de ce couloir complexifient les tentatives d'exploitation des données météorologiques en termes de période de retour. Par ailleurs, de petites avalanches démarrant dans la zone de transit (entre 1400 et 2000 m d'altitude) ont été observées (EPA). La végétation ligneuse est absente des zones d'accumulation et d'écoulement. La photo-interprétation utilisée pour la réalisation de la carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) décrit une zone d'arrivée trilobée (Figure 1, lobes L1, L2, L3). De forme conique, d'une longueur de 800 m, d'une surface de 49 hectares et d'un dénivelé de 400 m (1300-1700 m), cette zone est dominée par une corniche de 500 m de gneiss indifférenciés constituant l'assise du massif de la Meije au sud de Villar-d'Arène.

2 - Acquisition et traitement du matériel dendrochronologique

a - Evolution de la forêt et échantillonnage

A l'échelle du versant, nous avons reconstitué l'évo-

lution du mélèzin depuis 1913 (Figure 1). Une cartographie diachronique a été établie au moyen des cartes topographiques (1913, 1931, 1989) et des photographies aériennes disponibles (1952, 2001). Elle permet de spatialiser et de quantifier les surfaces boisées. Cette cartographie, complétée par les informations fournies par la CLPA, a servi de support à l'échantillonnage stationnel. Trois transects longitudinaux ont été réalisés sur chacun des lobes identifiés sur la CLPA. Pour chaque transect, des arbres ont été échantillonnés à l'intérieur de l'emprise CLPA "enquête de terrain", CLPA "photo-interprétation" et hors de l'emprise CLPA.

Trois types de zones ont pu être identifiés :

- des secteurs boisés dès avant 1913, sans traces récentes d'avalanches au niveau de L1 ;
- des zones colonisées depuis une cinquantaine d'années situées dans L2 ;
- des zones peuplées depuis moins de 20 ans dans lesquelles on relève des traces d'événements avalancheux récents situées sur ou en marge des zones actives.

A l'échelle des individus, 234 arbres ont été échantillonnés : 29 sur L1, 67 sur L2, 87 sur L3 et 51 hors emprise CLPA. Les arbres les plus gros ou ne présentant pas de trace d'impact ont été sondés à la tarière de Pressler. Des rondelles (170) ont été prélevées sur les arbres morts ou impactés dont l'avenir était compromis et/ou ne présentant plus de qualité sylvicole. L'ensemble des prélèvements a été localisé au moyen

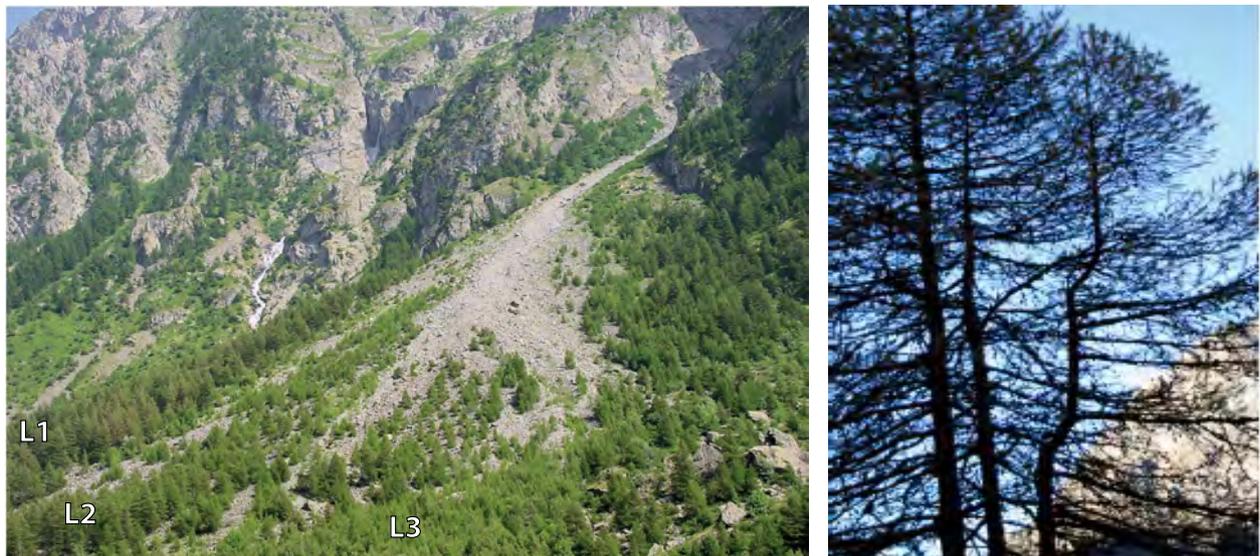
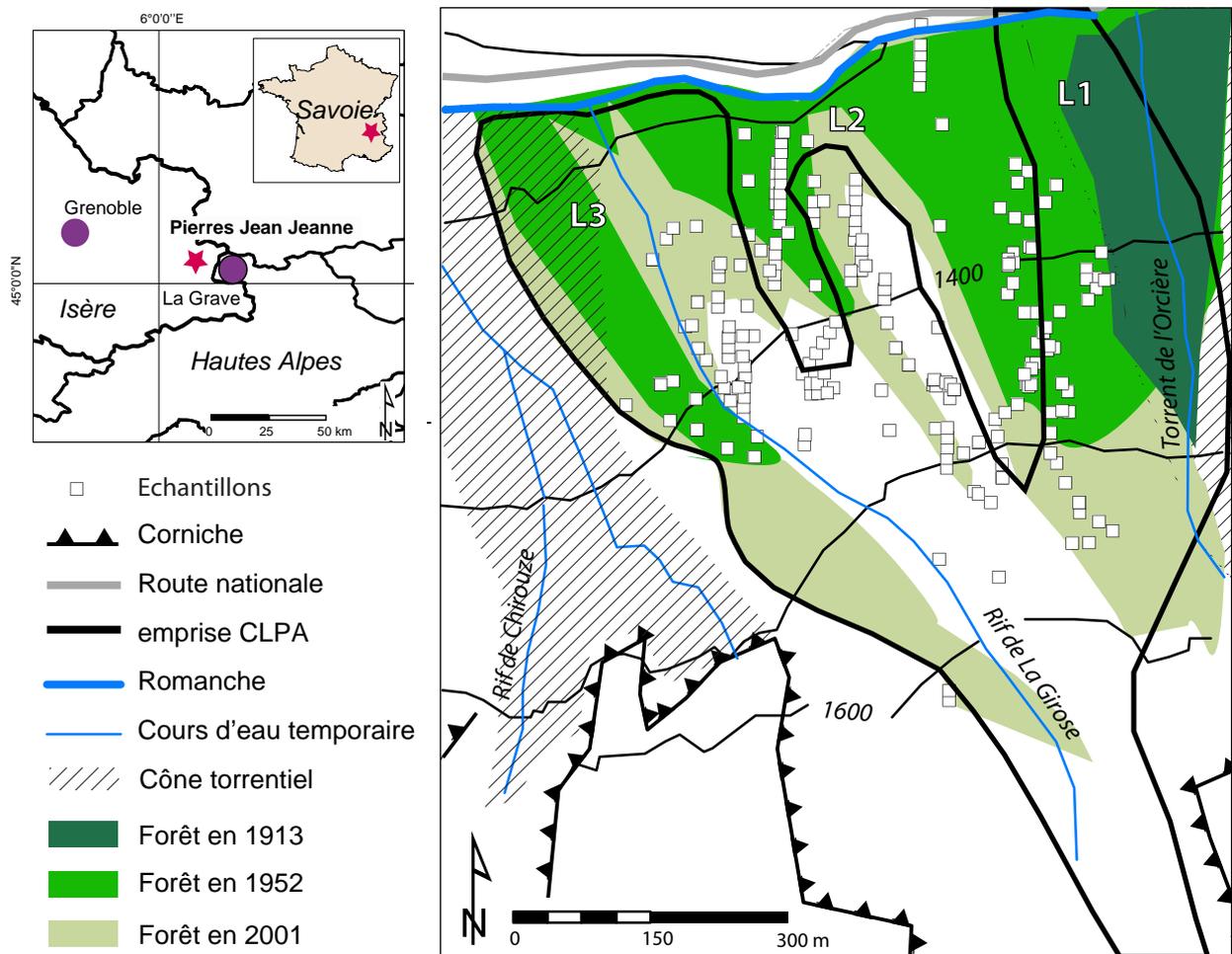


Figure 1 - Aperçu du site d'étude et évolution du mélèze sur le dépôt Pierre Jean Jeanne.
Photo de gauche, vue du site d'étude, photo de droite, arbre impacté.

d'un système GPS différentiel de type Trimble (précision +/- 1 m). De plus, 20 mélèzes ne montrant aucune perturbation de croissance ont été échantillonnés en dehors de l'emprise CLPA afin d'obtenir une série de référence.

b - Préparation et analyse des échantillons

Les échantillons ont été préparés selon une procédure dendrochronologique standard (Bräker, 2002). Ils ont été soigneusement poncés à différents grains en labora-

toire puis les séries de cernes ont été mesurées avec une précision théorique de 1/100 mm au moyen d'une table de mesure Lintab. Afin de pouvoir comparer les patrons de croissance des arbres entre eux, les séries de largeurs brutes de chacun des échantillons ont été standardisées au moyen d'une courbe exponentielle cubique ou d'une régression linéaire puis d'une fonction spline cubique (Cook et Kairiukstis, 1990). Une série de référence a été construite à partir des échantillons non perturbés prélevés hors emprise CLPA présentant les coefficients de corrélation (r) les plus élevés. L'interdatation a été réalisée au moyen des cernes caractéristiques. Les cernes étroits de 1906, 1937, 1946, 1956, 1962, 1972, 1983 et 1986 de la série de référence ont été utilisés comme cernes diagnostics.

c - Dendrogéomorphologie et reconstruction des avalanches majeures

Lors d'une avalanche, la masse de neige et de débris peut, en fonction de l'énergie mécanique lors de l'impact, incliner, blesser ou casser les arbres. Ces morphologies sont associées à des caractéristiques anatomiques qui peuvent être précisément datées au moyen de méthodes dendrochronologiques (Butler et Malanson, 1985). Ainsi, un arbre penché essaie de retrouver sa verticalité en produisant du bois de réaction. Ces cernes peuvent être identifiés visuellement par leur largeur anormalement élevée et par leur couleur (jaune ou brun-rouge). Microscopiquement, ils se caractérisent par une épaisseur importante de la paroi des trachéides des cellules du bois initial et du bois final. Lorsque l'énergie de l'impact est assez importante pour endommager localement le cambium, la croissance est interrompue au niveau de la zone blessée. Afin de minimiser le risque de cassure et de parasitisme, l'arbre va cicatrifier la blessure en produisant, immédiatement après l'impact, un tissu calleux qui recouvre progressivement la cicatrice d'impact. De plus, certains conifères, dont le mélèze, peuvent former des lignes tangentielles de canaux résinifères traumatiques (Bollschweiler *et al.*, 2008). Enfin, lorsque le souffle d'une avalanche en aérosol, par exemple, cause la décapitation de l'arbre ou la perte de nombreuses branches, l'appareil photosynthétique est considérablement réduit et une réduction de croissance abrupte apparaît dans les cernes de croissance (Butler

et Malanson, 2005). Pour cette recherche, l'apparition de tissu calleux et de canaux résinifères traumatiques, la mise en place de bois de réaction et les réductions de croissance abruptes ont été systématiquement datées.

Les données ont ensuite été synthétisées et pour chaque année t , un indice I a été calculé (Reardon *et al.*, 2008) sur la base du pourcentage d'arbres présentant un défaut de croissance comparé au nombre d'arbres échantillonnés vivant selon la formule :

$$I_t = ((\sum R_t) / (\sum A_t)) \cdot 100$$

Où : R représente la réponse d'un arbre à un impact au cours de l'année t ;

A représente le nombre d'arbres échantillonnés pour l'année t .

Une année a été considérée comme potentiellement avalancheuse lorsque I atteint au moins 10 (Dubé *et al.*, 2004 ; Reardon *et al.*, 2008 ; Butler et Sawyer, 2008). De plus, afin de limiter les surestimations liées au faible effectif en début de chronologie, une année a été considérée avalancheuse à partir du moment où le nombre d'impacts est au moins égal ou supérieur à 10. La spatialisation des arbres présentant des perturbations de croissance a été réalisée pour chacune de ces années au moyen du logiciel ArcGis. Les années avalancheuses reconstruites ont été comparées aux données historiques figurant dans l'EPA et /ou dans les monographies régionales (Allix, 1929).

d - Calcul et spatialisation de la période de retour

La période de retour désigne l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux perturbations de croissance au sein d'un même arbre. Pour chaque arbre (T), la période de retour (R_p) a été obtenue en divisant son âge (A) par le nombre de perturbations de croissance identifiées (GD) :

$$R_p = ((\sum A) / (\sum GD))$$

Elle a ensuite été spatialisée au moyen du module Geostatistical Analyst de ArcGis. Le krigeage a été utilisé comme méthode d'interpolation pour calculer la période de retour dans des secteurs où la dendrogéomorphologie ne le permet pas (Fortin et Dale, 2005).

II - RÉSULTATS

1 - Colonisation végétale rapide du dépôt au cours du XX^e siècle et structure d'âge du peuplement

La Figure 1 présente l'évolution du couvert forestier sur la zone de dépôt depuis 1913. Entre 1913 et 1933, la surface du peuplement est stable (10 hectares environ,

soit 20% de la surface totale). Il est cantonné dans la partie est du cône, au niveau de L1, en rive droite du Rif de la Girose. Depuis 1933, la surface du peuplement est en augmentation : 24 hectares en 1952 (+214%), 27 hectares en 1989 (+242%), 36 hectares en 2001 (+332%). Dans le détail, la comparaison entre les cartes de 1952 et 2001, issues de la photo-interprétation, montre une

colonisation importante et continue de la partie est du dépôt, une densification du boisement de L1 et un début de fermeture latérale de L2. Dans L3, la progression du boisement, de type frontale, sous forme d'îlots arbustifs et arborés, est plus lente.

La structure d'âge des arbres échantillonnés confirme cette évolution. Les 232 mélèzes (*Larix decidua* Mill.) échantillonnés ont un âge de moyen de 63 ans (écart-type : 20 ans). Il s'agit d'un âge relatif dans la mesure où les prélèvements ont été effectués à 1 m et non au niveau du collet. L'arbre le plus ancien a atteint 1 m en 1857, le plus jeune en 1991. La Figure 2 montre que les secteurs situés dans les axes de L2 et L3 sont colonisés depuis les décennies 1960-1980, l'âge moyen des arbres étant compris entre 25 et 40 ans. Cette répartition

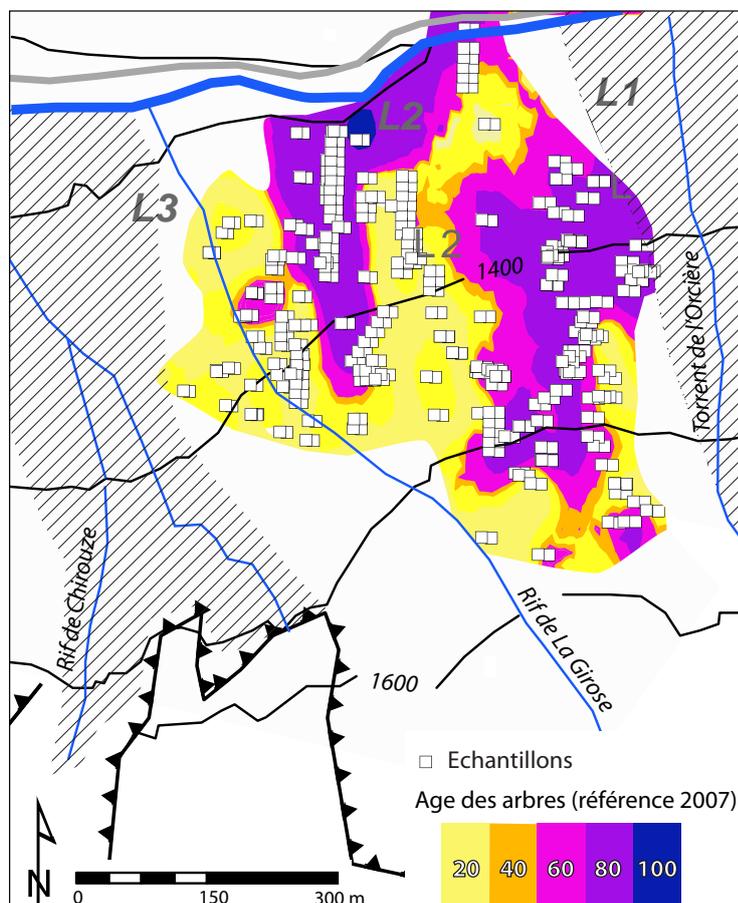


Figure 2 - Structure d'âge des arbres prélevés sur le dépôt.

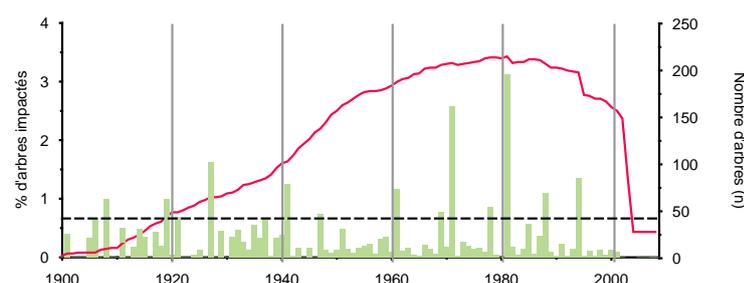


Figure 3 - Fréquences annuelles d'apparition des perturbations de croissance (en vert) pour l'ensemble des arbres échantillonnés (en rouge).

relativement homogène suggère qu'un événement de forte ampleur a pu éliminer une partie du peuplement durant ces décennies. En dessous de 1400 m, dans les portions de dépôt situées entre L1 et L2, L2 et L3, et dans la partie centrale de L3, l'âge moyen atteint 80 ans ce qui suggère l'absence d'événements majeurs récents.

2 - Historique des avalanches majeures

Les 374 échantillons (224 carottes et 150 sections) sélectionnées sur les 232 arbres échantillonnés ont permis l'identification de 901 perturbations de croissance. Les lignes tangentielle de canaux résinifères (40% des perturbations) et le bois de réaction (38%)

suite à un basculement sont les perturbations les plus fréquemment recensées. Le tissu calleux et les réductions abruptes de croissance représentent respectivement 12% et 10% des perturbations identifiées.

L'échantillon dépasse 10 individus en 1912. Sa taille augmente de façon importante après 1935, et en 1943, la moitié des arbres échantillonnés (116) ont formé au moins un cerne. La perturbation de croissance la plus ancienne a été datée à 1904. La fréquence des perturbations augmente dans les années 1910 et après 1919, on recense au moins une perturbation par an. Finalement, en tenant compte des seuils fixés, 18 années avalancheuses ont été identifiées au cours du siècle écoulé : 1919, 1921, 1927, 1929, 1932, 1935, 1937, 1940, 1941, 1947, 1961, 1969, 1971, 1978, 1981, 1988, 1994 (Figure 3). En 1951 et 1971, le seuil d'impacts est proche de 10% et les hivers sont considérés comme particulièrement avalancheux dans les Alpes. Pour ces raisons, les deux années ont été incluses à la reconstitution.

3 - Estimation et cartographie de la période de retour

La période de retour moyenne sur l'ensemble du dépôt a été calculée pour cinq intervalles :

- la longueur entière de la chronologie ;
- la période au cours de laquelle l'échantillon dépasse 10 individus mais où la documentation historique est rare (1912-1951) ;
- la période pour laquelle l'échantillon dépasse 10 individus et où l'EPA est correctement documentée (1952-2007) ;
- la période pour laquelle les données

météorologiques d'enneigement sont disponibles (1964-2007) ;

- la période couvrant le réchauffement climatique récent dans les Alpes (1981-2007). Pour ces cinq intervalles, la période de retour moyenne varie entre 3,6 et 6,8 années et atteint 4,8 années en moyenne.

D'un point de vue spatial, la période de retour augmente rapidement vers l'aval, en particulier dans la partie est du dépôt. La cartographie réalisée sur la durée totale de la chronologie (Figure 4) montre des périodes de l'ordre de 15 ans dans la partie distale de L3, dans l'axe du Rif de la Girose, et des périodes de retour de 50 ans dans la partie basale de L2. La distance entre ces deux zones est d'environ 300 m alors que leur altitude est similaire. Sur le plan longitudinal, la période de retour augmente graduellement dans l'axe de L2 ; elle est estimée à 2,5 ans dans la partie apico-proximale du lobe et à 50 ans dans sa partie distale. Sur le reste du dépôt, l'augmentation se fait en deux étapes : elle double quasiment entre 1500 (10,5 ans) et 1450 m d'altitude (17 ans) et atteint 50 ans à 1350 m d'altitude.

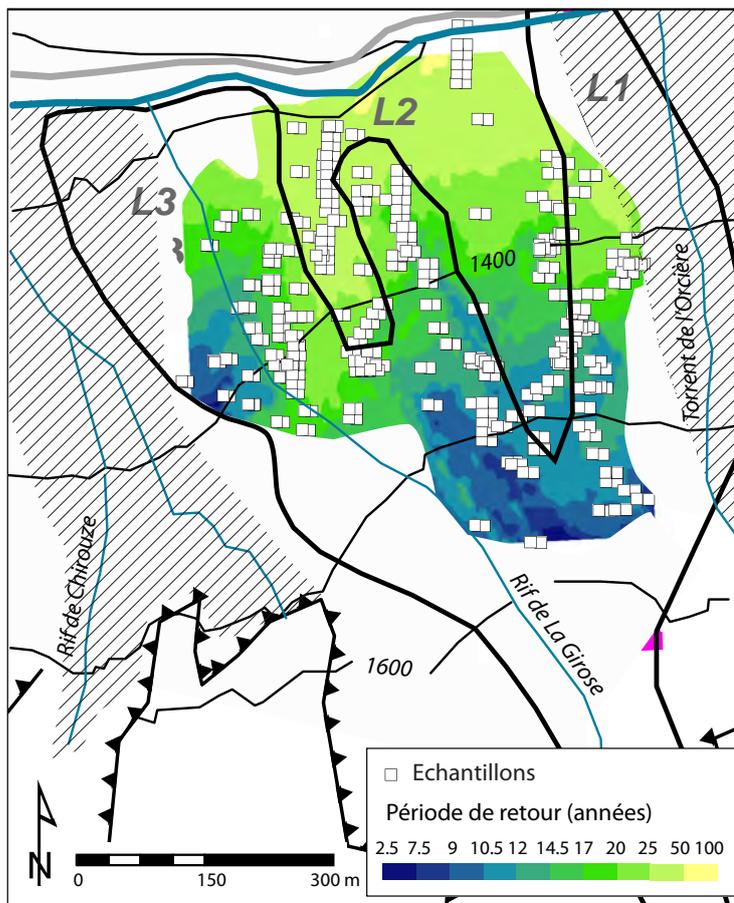


Figure 4 - Période de retour des avalanches sur le dépôt Pierres Jean Jeanne.

III - DISCUSSION

1 - Qualité de la reconstruction d'un point de vue temporel

Les données récoltées ont permis de reconstruire une chronique avalancheuse qui remonte jusqu'à 1912 et de spatialiser 20 avalanches majeures. La répartition des épisodes, 1 à 3 par décennies, est relativement homogène. Aucun événement n'est cependant recensé ou reconstruit depuis 1994. Sept avalanches, entre 1951 et 1994, sont recensées dans l'EPA : 1959, 1961, 1969, 1971, 1978, 1988, 1994, avec mention de deux pylônes électriques cassés pour celle de 1988. Cinq sont indirectement confirmées par les données historiques concernant l'activité avalancheuses en Oisans : 1919, 1921, 1927 (Allix, 1929), 1941 (MEDD, CEMAGREF, ONF 2006) et 1981 (Ancey, 1998). Par exemple, l'hiver 1921 est décrit par Allix (1923) comme particulièrement avalancheux. Il cite notamment la nuit du 2 au 3 mars 1921 au cours de laquelle « une centaine d'avalanches dont 10 au moins de grande conséquence » sont tombées. Huit événements reconstruits sont absents des recensements mais les deux seuils utilisés garantissent la qualité de la reconstruction et minimisent le risque

d'erreur puisqu'ils permettent de rejeter les perturbations liées à d'autres processus géomorphologiques (reptation nivale, chutes de blocs) qui affectent souvent un nombre limité d'arbres (Stoffel *et al.*, 2006).

Toutefois, cette reconstruction de l'occurrence demeure incomplète. La comparaison entre l'historique avalancheux établi à partir d'observations directes et la reconstruction de l'occurrence par dendrogéomorphologie montre que près de 50% de l'occurrence avalancheuse échappe à l'analyse dendrogéomorphologique. Le nombre d'avalanches reconstruit doit être considéré comme une fréquence minimale pour plusieurs raisons :

- les avalanches doivent avoir une magnitude suffisante, estimée à 2,5 (McClung et Schaerer, 1993), pour avoir des impacts écologiques sur la végétation ligneuse ; cette magnitude est considérée comme moyenne, sur une échelle qui compte 5 niveaux. Elle correspond à des avalanches dont les pressions d'impact sont de l'ordre de 100 kPa. Leur longueur totale est comprise entre 100 et 1000 m, leur volume entre 1000 et 10 000 m³ ;
- les avalanches qui n'atteignent pas la zone boisée

- ne peuvent, de fait, être reconstruites ;
- la méthodologie employée minimise le risque d'erreur lors de l'identification des années avalancheuses mais peut également conduire à écarter certaines avalanches de faible intensité ou limitées spatialement (Reardon *et al.*, 2008). C'est probablement pour cette raison que les avalanches de 1951, 1957, 1960, 1965 et 1975, listées dans l'EPA comme des occurrences de faible intensité n'ont pu être reconstruites ;
 - enfin, une grosse avalanche peut masquer les traces laissées par des événements antérieurs de plus faible amplitude. Ainsi, les avalanches de 1961 et 1971, à l'origine de nombreuses perturbations de croissance, ont probablement masqué les traces des événements de 1962 et 1972 recensés dans l'EPA.

2 - Qualité de la reconstruction d'un point de vue spatial

La cartographie diachronique et l'étude de la structure d'âge du peuplement montrent que les arbres les plus âgés sont situés dans la partie est et dans la zone distale du dépôt. Dans la partie ouest et dans la zone apico-proximale, les arbres sont beaucoup plus jeunes. Cette répartition est cohérente avec la cartographie de la période de retour. Les arbres situés dans les parties apicale et occidentale du cône sont régulièrement éliminés par des avalanches dont la période de retour est

inférieure à 10 ans. Au contraire, les arbres localisés à l'est et en zone distale, soumis à des avalanches ayant une période de retour pluri-décennale, apparaissent préservés.

En ce qui concerne l'extension longitudinale des événements, la reconstruction coïncide avec les données historiques. Par exemple, les avalanches de 1921 et 1943 qui ont traversé la Romanche et coupé la route nationale (Allix, 1923 ; Blanchard, 1943) apparaissent comme des événements à forte extension longitudinale dans la reconstruction avec des arbres impactés dans la partie distale de L2. De même, depuis 1959, l'EPA liste 10 événements ayant atteint une altitude de 1200 m. Ceux de 1959, 1961, 1969, 1971, 1988 et 1994 sont reconstruits avec une très forte extension longitudinale.

L'extension latérale montre une très forte variabilité qui, selon Reardon *et al.* (2008), résulte de conditions d'accumulation hétérogènes ou de l'occurrence de plusieurs événements selon des directions différentes au cours d'un même hiver. Le déplacement latéral de la trajectoire préférentielle de L1 vers L3 concorde avec la cartographie diachronique et explique en grande partie la colonisation rapide de L1. Cette extension est mal documentée tant dans les données historiques que dans l'EPA. Cependant, des écarts importants apparaissent entre l'enveloppe avalancheuse maximale reconstruite et l'emprise figurée sur la CLPA. Plusieurs événements impactent les zones localisées entre L1/L2 et L2/L3 situées en dehors de l'emprise CLPA, démontrant ainsi l'intérêt de l'approche dendrogeomorphologique pour la cartographie et la gestion de l'aléa.

CONCLUSION

Le travail réalisé ici montre que la colonisation ligneuse constatée sur le dépôt Pierres Jean Jeanne résulte probablement de l'absence d'événements majeurs depuis 1994 et d'une modification de la trajectoire préférentielle des avalanches plutôt que de l'augmentation thermique constatée au cours des trois dernières décennies. Il démontre également que la dendrogeomorphologie est utilisable comme outil

diagnostic dans le cadre d'un zonage du risque avalancheux, notamment dans le cas de dépôts non ou mal documentés. La méthode pourrait cependant être améliorée en travaillant sur des couloirs précisément documentés, par réplique sur plusieurs talus et en essayant d'identifier des différences anatomiques liées à des avalanches en aérosol et à des avalanches de fonte.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLIX A., 1923. Les avalanches de l'hiver 1922-23 en Dauphiné. *Revue de Géographie Alpine*, 11, 513-527.
- ALLIX A., 1929. Un pays de haute montagne : l'Oisans, étude géographique. Laffite, Marseille.
- ANCEY C., 1998. Guide neige et avalanches - Connaissances, pratiques, sécurité. Edisud, France.
- BEZZI M., CANTIANI M.G., CIOLLI M., COMUNELLO G., CHERUBINI P., 2003. Leggere gli anelli degli alberi per ricostruire la frequenza e l'estensione delle valanghe nel passato. In DE ANGELIS P., MACUZ A., BUCCI G., MUGNOZZA G.S. (eds) Atti del III Congresso Nazionale: Alberi e foreste per il nuovo millennio. Viterbo, Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale, 147-152.

- BLANCHARD R., 1943. Les Alpes occidentales. Les Cluses préalpines et le Sillon alpin, Tome 2. Arthaud, France.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., BOURQUI K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree physiology*, 28, 255-263.
- BOUCHER D., FILION L., HÉTU B., 2004. Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, Gaspésie centrale (Québec). *Géographie Physique et Quaternaire*, 58, 164-176.
- BRÄKER O.U., 2002. Measuring and data processing in tree-ring research - a methodological introduction. *Dendrochronologia*, 20, 203-216.
- BURROWS C.J., BURROWS V.L., 1976. Procedures for the study of snow avalanche chronology using growth layers of woody plants. University of Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper, 23, 13-24.
- BUTLER D.R., MALANSON G.P., 1985. A history of high-1 magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Mountain Research and Development*, 5 175-182.
- BUTLER D.R., SAWYER C.F., 2008. Dendrogeomorphology and high-magnitude snow avalanches: a review and case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 303-309.
- COOK E.R., KAIRIUKSTIS L., 1990. Methods of dendrochronology. Kluwer, Dordrecht.
- DIDIER L., BRUN J.-J., 1998. Limite supraforestière et changements environnementaux : pour une approche pluriscalaire et spatialisée des écosystèmes d'altitude. *Géographie physique et quaternaire*, 52, 245-253.
- DUBÉ S., FILION L., HÉTU B., 2004. Tree-Ring Reconstruction of High-Magnitude Snow Avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36, 555-564.
- FORTIN M., DALE M., 2005. Spatial Analysis: a Guide for Ecologists. Cambridge University 39 Press, Cambridge.
- GLASS B., HUET P., RAT M., TORDJEMAN R., 2000. Retour d'expérience sur l'avalanche du 9-10 février 1999 à Montroc, commune de Chamonix après la phase contradictoire. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Inspection générale de l'environnement, France.
- JAMARD A.L., GARCIA S., 2002. L'enquête permanente sur les avalanches (EPA). Statistique descriptive générale des événements et des sites. Ph.D. Thesis, Univ. Joseph Fourier, Grenoble.
- MEDD, CEMAGREF, ONF 2006. Enquête Permanentes sur les Avalanches (EPA), Liste des sites et des événements, commune de la Grave, 96 p.
- MCCLUNG D., SCHAEERER P., 1993. The Avalanche Handbook. The Mountaineers, Seattle, WA.
- MUNTAN E., ANDREU L., OLLER P., GUTIÉRREZ E., MARTINEZ P., 2004. Dendrochronological study of the Canal del Roc Roig avalanche path: first results of the Aludex project in the Pyrenees. *Annals of Glaciology*, 38, 173-179.
- REARDON B.A., PEDERSON G.T., CARUSO C.J., FAGRE D.B., 2008. Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40, 148-160.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., HASSLER G.R., 2006. Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity - a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1424-1437.

CARACTÉRISATION DE LA CROISSANCE RAÇINAIRE D'ESSENCES LIGNEUSES IMPLANTÉES SUR DES DIGUES FLUVIALES

GROWTH CHARACTERIZATION OF WOODY ROOTS ON RIVER DIKES

CAROLINE ZANETTI^{1,4}, FRÉDÉRIC GUIBAL², MAXIME BRUGIER¹,
MICHEL VENNETIER³, PATRICE MÉRIAUX¹, MIREILLE PROVANSAL⁴

¹ Cemagref, UR Ouvrages hydrauliques et hydrologie, 3275 route de Cézanne, CS 40061, F 13182 Aix-en-Provence cedex 5.

² IMEP - UMR 6116 - CNRS, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, Bat. Villemin, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

³ Cemagref, UR Ecosystèmes méditerranéens et risques, 3275 route de Cézanne, CS 40061, F 13182 Aix-en-Provence, cedex 5.

⁴ CEREGE, Europôle de l'Arbois, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

Contact : caroline.zanetti@cemagref.fr

RÉSUMÉ

*Le développement des arbres sur les digues en terre est peu souhaitable du point de vue de la sécurité des ouvrages. Au-delà d'une certaine dimension, dépendante de l'âge des arbres, de l'espèce et du milieu, les systèmes racinaires génèrent des risques d'érosion qui peuvent être importants sur les digues anciennes et densément boisées. Outre la sécurité, la gestion et l'entretien de la végétation arborescente implantée sur les digues nécessitent la prise en compte de plusieurs autres paramètres, tels que les fonctions écologiques et sociales des boisements rivulaires. L'objectif de cette étude est donc de déterminer des seuils critiques basés sur les dimensions des racines qui permettront d'affiner les recommandations de gestion. Ces dimensions dépendant en partie de l'âge, la relation entre le diamètre des racines et leur âge a été évaluée, complétée par l'analyse de la vitesse de croissance des racines en fonction des espèces végétales, des individus, de l'âge des souches, des matériaux constitutifs du remblai et des modalités de gestion. Les échantillons de racines ont été prélevés sur des souches de feuillus extraites des levées de la Loire ainsi que sur des souches de résineux implantées sur une digue de retenue dans les Alpes Maritimes. Les espèces étudiées sont le peuplier (*Populus hybrida*), le robinier (*Robinia pseudoacacia*), le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), l'érable negundo (*Acer negundo*), le mélèze (*Larix decidua*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). La vitesse de croissance des racines est très dépendante de l'espèce. Le ratio âge/diamètre des grosses racines d'un arbre semble proportionnel au ratio âge/diamètre du tronc. Cependant, de nombreux paramètres influencent ce ratio, et des travaux complémentaires sont indispensables pour aboutir à un système opérationnel fiable d'aide à la décision.*

MOTS-CLÉS : SÉCURITÉ DES DIGUES EN TERRE, RACINE LIGNEUSE, RELATION ÂGE/DIAMÈTRE.

ABSTRACT

Tree growth on earth dikes generates safety problems and reduces embankments durability. Tree root systems create erosion risks, particularly internal erosion phenomena which can be destructive on old wooded dikes. Besides the safety, management and maintenance of woody vegetation on dikes require the consideration of several other parameters, such as ecological and social functions of the riparian forest. The objectives of this study are to determine critical thresholds based on root dimensions which allow to specify management rules. These dimensions depending of age, the relation between root diameter and their age was estimated, and completed by growth speed analyses in function of species, stumps age, dike materials and management modalities.

*Root samples were taken from broadleaved-trees stumps extracted from Loire levee and from conifer trees stumps implanted on a mountain river dike in the Alpes-Maritimes. The studied species are poplar (*Populus hybrida*), locust (*Robinia pseudolocust tree*), oak (*Quercus pubescens*), negundo maple (*Acer negundo*), larch (*Larix decidua*) and scots pine (*Pinus sylvestris*). Roots growth speed is very dependent of the species. The ratio age/diameter of big roots seems proportional to the ratio age/diameter of tree trunk. However, numerous parameters influence this ratio, and additional works are indispensable to succeed in a reliable operational system of decision-making support.*

KEYWORDS: EARTH DIKE SAFETY, WOODY ROOT, AGE/DIAMETER RELATIONSHIP.

INTRODUCTION

Le système racinaire des arbres est une variable encore mal connue, notamment au niveau des risques qu'elle fait encourir aux ouvrages hydrauliques en terre. Par précaution, les recommandations habituelles sont d'empêcher l'installation des arbres sur les digues et les barrages. La nécessité d'intégration paysagère, la fonction d'accueil du public jouée par certaines digues, parfois la volonté de stabiliser les talus ou encore un simple manque d'entretien ont conduit au développement des arbres sur ou à proximité de ces ouvrages. De telles situations engendrent une interrogation sur les modalités de gestion des digues déjà boisées (Venetier *et al.*, 2005).

La végétation sur les digues gêne la surveillance visuelle et la détection de désordres éventuels sur les talus ; elle favorise la présence d'animaux fouisseurs qui creusent leurs terriers dans les remblais et les systèmes racinaires sont un facteur de fragilisation à court et moyen terme (Mériaux *et al.*, 2007 ; Mériaux *et al.*, 2006).

L'enracinement des arbres génère deux types de risques pour les digues (Zanetti, 2007) :

- premièrement, l'érosion interne : principale cause de rupture des ouvrages en remblai, ce risque est aggravé par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéités dans le corps de digue. De leur vivant, les racines ont une action mécanique défavorable : elles induisent le décompactage des matériaux et la déstructuration des revêtements maçonnés lorsque la digue en est dotée. Il faut cependant noter qu'à contrario ces racines peuvent améliorer localement et temporairement la cohésion des matériaux. Ceci n'est généralement pas pris en compte dans la gestion actuelle de la végétation, étant donné que la stabilité des talus est calculée à la construction des ouvrages. Cependant, des plantations ont été réalisées dans le passé sur de nombreuses digues et des talus de barrages dans

l'objectif affiché de lutte contre l'érosion et de stabilisation des pentes. Après pourrissement, les racines génèrent un risque de renard hydraulique du fait de la création de conduits, favorisant les circulations d'eau et pouvant conduire à la formation de brèche par effondrement ;

- deuxièmement, l'érosion externe : l'arrachement d'un arbre sur le talus côté rivière, peut induire une déstabilisation de l'ouvrage suite à l'ablation, par le système racinaire, d'une loupe de terre plus ou moins importante. Ces hétérogénéités de surface favorisent, lors des crues, le développement de courants tourbillonnaires qui sont à l'origine d'affouillements pouvant déstabiliser le talus de l'ouvrage. Ce type de phénomène se rencontre sur les digues de cours d'eau soumises à une forte vitesse de courant. Enfin, l'arrachement d'un arbre en crête de digue peut diminuer la hauteur de celle-ci et être l'origine d'une surverse.

L'importance du risque dépend de la structure de l'enracinement (type d'architecture, volume, nombre, longueur et diamètre des racines), des dimensions de l'ouvrage et des propriétés des matériaux constituant le corps de digue, dans le cas de l'érosion interne et de la dimension de la partie aérienne de l'arbre (prise au vent) pour ce qui est de l'érosion externe (Zanetti *et al.*, 2008).

L'objectif de cette étude préliminaire est de déterminer s'il existe des seuils critiques en termes d'âge des souches, en se basant sur les dimensions des racines. Il s'agit, dans un premier temps, d'évaluer l'existence d'une relation entre le diamètre des racines et leur âge, puis de caractériser la vitesse de croissance en fonction des espèces et des types racinaires. Ces seuils doivent aussi prendre en compte le type de matériaux constitutifs des ouvrages, dont dépend le niveau de risque. A plus long terme, on cherche à constituer un outil d'aide à la décision pour la gestion de la végétation arborescente sur les digues.

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Présentation des sites d'études

a - Cosne-sur-Loire

Le premier site se localise sur une levée de la Loire à Léré, bourg à proximité de Cosne-sur-Loire dans la Nièvre. Il s'agit d'un ouvrage créé initialement pour protéger les terres agricoles. Confortées après chaque grande crue historique, ces digues protègent aujourd'hui les zones urbaines contre les hautes eaux de la Loire. Elles sont constituées de matériaux extraits de la rivière, essentiellement sableux sur la zone d'étude.

Ce secteur est soumis à un climat océanique dégradé avec une température annuelle moyenne de 10,5 °C (minima mensuel de 5,5 °C et maxima mensuel de 15,5 °C). La pluviométrie annuelle est de 800 mm. Ce site, en bordure de rivière, offre des conditions de croissance très favorables à la végétation.

Les espèces que nous avons étudiées sont le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.), l'érable négundo (*Acer negundo* L.), le robinier faux-acacia (*Robinia pseudo-acacia* L.) et le peuplier hybride (*Populus hybrida*). Cinq souches par espèce ont été excavées. Les systèmes racinaires avaient une morphologie fasciculée, avec une grande densité de racines.

Les matériaux sableux peu contraignants sont propices au développement d'une structure racinaire homogène (Figure 1).



Figure 1 - Système racinaire fasciculé de Robinier, extrait de la digue de Léré.

b - Castérino

Le second site se localise sur une digue de fermeture de barrage à Castérino, dans le Parc National du Mercantour, dans la haute vallée de la Roya (Alpes-Maritimes). Cet ouvrage assure les mêmes fonctions qu'une digue de protection contre les crues. Le remblai est hétérogène, constitué de blocs calcaires entourés d'une matrice limono-sableuse.

Ce secteur est soumis à un climat montagnard aux influences méditerranéennes, avec des hivers froids et des étés chauds. La température annuelle moyenne est de 7°C (minima mensuel de -4,5°C et maxima mensuel de 21°C). Les précipitations sont abondantes (plus de 1100 mm/an) et particulièrement violentes. Les arbres implantés sur la digue disposent d'un sol profond et de conditions de croissance favorables.

Les espèces étudiées sont le mélèze (*Larix decidua* Mill.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Huit souches au total ont été excavées. Les systèmes racinaires avaient une morphologie mixte (composés d'un système traçant dense et de plusieurs pivots importants). Les matériaux grossiers contraignants induisent le développement de structures racinaires complexes (Figure 2).

2 - Plan d'échantillonnage et préparation des échantillons

Les arbres étudiés avaient entre 15 et 75 ans. Les échantillons de racines ont été prélevés sur les souches de feuillus extraites des levées de la Loire et sur les souches de résineux implantées sur la digue de Castérino. Au total, 330 échantillons ont été prélevés, 190 pour étudier la relation âge/diamètre et 140 pour analyser la croissance des racines en fonction des types

racinaires (Figure 3). Les racines sont séparées en 3 groupes (Zanetti *et al.*, 2008) : les longues (majoritairement superficielles et peu ramifiées, Figures 4 et 5 b), les courtes (généralement pénétrantes et très ramifiées, Figures 5 a et 5 b) et les pivots (verticaux, avec un nombre de ramifications variable, Figure 5 c).

Pour l'étude de la relation âge/diamètre (A/D), les types de racines n'ont pas été pris en compte : nous avons utilisé quatre classes de diamètre (2, 5, 8 et 10 cm) et la distance de prélèvement par rapport au collet a été notée. Pour l'étude de la croissance (CT), les racines ont été choisies en fonction de leur type et selon leurs caractéristiques morphologiques puis débitées en 4 à 5 morceaux répartis sur toute la longueur de la racine en notant la distance entre chaque prélèvement.



Figure 2 - Système racinaire mixte de Mélèze, extrait de la digue de Castérino.

| Type d'étude | A/D | CT |
|-----------------------------|-----|-----|
| Site 1 - Levée la Loire | 126 | 96 |
| Site 2 - Digue de Castérino | 64 | 44 |
| Sous total | 190 | 140 |
| Total | 330 | |

Figure 3 - Nombre d'échantillons prélevés et analysés par site prélevés sur les 28 arbres étudiés (20 feuillus et 8 conifères).



Figure 4 - Racine traçante longue d'Érable.



Figure 5 - Quelques types de systèmes racinaires :
 a) racine traçante courte d'Érable ;
 b) racines traçante longue et courte de Pin sylvestre ;
 c) pivot de Pin sylvestre.

Suivant la méthodologie exposée dans Gärtner *et al.* (2001) et Bodoque *et al.* (2005), les échantillons de racines initialement prélevés (15 cm de longueur) ont séché à température ambiante pendant 1 à 2 mois, puis ont été recoupés en rondelles de 2 à 3 cm d'épaisseur. Les échantillons ont ensuite été ponçés avec des bandes abrasives aux tailles de grains décroissantes (Figure 6a). De la craie blanche a été frottée sur les rondelles ponçées afin d'augmenter les contrastes au niveau de la structure des cernes et de faciliter ainsi la lecture comme indiqué dans Krause *et al.* (1994). Le dénombrement des cernes de croissance a été effectué sous une loupe binoculaire (Figure 6b).

Les différences entre la structure du bois de la partie aérienne et celle de nos échantillons racinaires ont pu être observées à l'aide de l'atlas d'anatomie des bois de Schweingruber (1982). Les cernes de croissance sont généralement plus difficiles à identifier sur le bois racinaire.

Les âges des échantillons de racines ont été moyennés par classe de diamètre (8 échantillons par classe) pour chaque espèce. Les coefficients de détermination ont été calculés afin de vérifier la solidité de la relation âge/diamètre. Les résultats portant sur la croissance des racines n'ont été que partiellement traités.



Figure 6 - Travaux au laboratoire :
 a) ponçage des échantillons ;
 b) lecture de cernes sous loupe binoculaire.

II - RÉSULTATS

1 - Etude de la relation âge/ diamètre

Une relation entre l'âge et le diamètre des racines a été mise en évidence (Figure 7) : elle est de type puissance [$f(x) = bx^a$] qu'il s'agisse des feuillus ou des conifères. Avec les quatre classes de diamètre (2, 5, 8 et 10cm), le coefficient de détermination, toutes espèces confondues est de 0,7 (Figure 8). Très élevé chez le chêne, le peuplier, l'érable et le mélèze (0,8 à 0,9), ce coefficient est moyen chez le robinier (0,5) et faible chez le pin sylvestre (0,2).

Chez le pin sylvestre, la faiblesse de la relation s'explique par le fait que l'âge moyen des échantillons de la classe 10 cm (51 ans) est inférieur à celui de la classe 8 cm (54 ans) et égal à celui de la classe 5 cm, et que les écarts d'âge au sein d'une même classe sont élevés (Figure 7). Cette espèce présente les racines les plus âgées pour chaque classe de diamètre.

Chez toutes les autres espèces, les âges s'accroissent avec la classe de diamètre. Chez le mélèze, les âges moyens sont respectivement 25, 35, 46 et 49 ans. Les racines de conifères dans notre échantillon présentent une croissance plus lente que celle des feuillus du fait de leurs conditions de développement moins favorables (en milieu montagnard). Elles sont donc plus âgées que celles des feuillus à diamètre égal.

Pour les feuillus, on note une vitesse de développement croissante dans l'ordre suivant : érable negundo, peuplier, robinier et chêne (Figure 7).

L'érable négundo est une essence importée d'Amérique du Nord, à croissance rapide, considérée comme

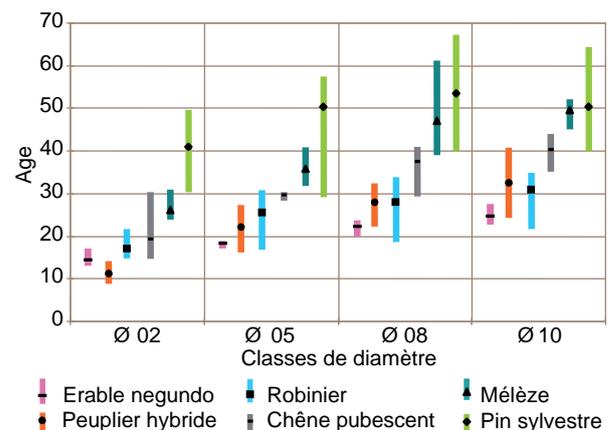


Figure 7 - Âge des racines en fonction des quatre classes de diamètre et de l'espèce végétale (moyenne +/- 1 écart-type).

invasive en bordure de cours d'eau. Les âges moyens des racines sont 14, 17, 21 et 24 ans pour les classes de diamètres considérées. La croissance des racines de peuplier est initialement un peu plus rapide que celle du robinier mais moins soutenue dans le temps, ce qui aboutit à des diamètres équivalents pour les âges élevés (10, 21, 27 et 31 ans contre 16, 25, 27 et 30 ans). Ces deux espèces sont des pionnières qui colonisent rapidement les remblais.

Le chêne a la vitesse de croissance racinaire la plus faible en diamètre. Il s'agit d'une espèce de peuplement mature apparaissant plus tard dans la succession végétale et à croissance aérienne lente. Les âges moyens sont 18, 28, 36 et 39 ans.

Les différences de croissance en diamètre des racines sont liées à l'espèce végétale mais également à la position de l'arbre sur la digue (Figure 9). En effet, les conditions de développement sont différentes suivant que l'arbre se trouve en milieu sec sur le talus coté terre (CT) ou en condition plus humide coté rivière (CR) et s'il est implanté soit en pied de digue (conditions plus humides) soit en haut (conditions drainantes). Dans le cas des feuillus, les érables étudiés se situaient principalement en pied de digue, tandis que les chênes étaient généralement implantés sur

la partie supérieure de la digue. Les peupliers et les robiniers avaient une répartition homogène. Dans le cas des conifères, les pins sylvestres étaient implantés sur le talus coté terre, en conditions drainantes et les mélèzes sur le talus coté rivière ou en crête.

| Espèces | Nb d'échantillons (Ø : 02 ; 05 ; 08 ; 10) | Coefficient de détermination (r^2) | Probabilité * $P < 0,05$ *** $P < 0,001$ | Coefficients b et a de $f(x) = bx^a$ |
|---------------|---|--|--|--------------------------------------|
| Chêne | 32 | 0,93 | *** | $y = 4,6787x^{0,4907}$ |
| Érable | 30 | 0,84 | *** | $y = 5,8058x^{0,301}$ |
| Peuplier | 32 | 0,85 | *** | $y = 1,8101x^{0,6505}$ |
| Robinier | 32 | 0,51 | *** | $y = 8,0744x^{0,2934}$ |
| Mélèze | 32 | 0,85 | *** | $y = 4x^{0,5695}$ |
| Pin sylvestre | 32 | 0,17 | * | $y = 23,043x^{0,1846}$ |
| Total | 190 | 0,69 | | |

Figure 8 - Relation âge/diamètre chez les six espèces étudiées.

| Espèces | Age le l'arbre le plus vieux | Position sur la digue | Diamètre au collet (cm) | Age de la plus vieilles racines | Diamètre de la racine (cm) | Rapport A/D arbre | Rapport A/D racine |
|---------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|
| Chêne | 45 | CR Haut | 67 | 43 | 9 | 1,49 | 0,21 |
| Érable | 32 | CR Milieu | 75 | 27 | 8,3 | 2,34 | 0,31 |
| Peuplier | 42 | CR Pied | 77 | 39 | 8,6 | 1,83 | 0,22 |
| Robinier | 47 | CR Haut | 73 | 34 | 7,5 | 1,55 | 0,22 |
| Mélèze | 67 | CT Haut | 69 | 60 | 7,5 | 1,03 | 0,13 |
| Pin sylvestre | 71 | CR Haut | 59 | 68 | 7,5 | 0,83 | 0,11 |

Figure 9 - Caractéristiques des arbres et racines les plus âgés en fonction des espèces

Le rapport âge/diamètre pour les arbres et pour les racines des sujets les plus âgés permet de rendre compte des vitesses de croissance pour chaque espèce considérée (Figure 9). Les essences peuvent être classées en fonction de leur vitesse de croissance selon un gradient positif : pin sylvestre, mélèze, chêne, robinier, peuplier et érable. Il existe une forte corrélation des rapports A/D des parties aériennes et des plus grosses racines toutes espèces confondues ($r^2 = 0,96$). On peut en déduire, pour les arbres non recépés, la taille potentielle des plus grosses racines en connaissant les dimensions et l'âge de la partie aérienne.

2 - Étude de la croissance des racines en fonction de leur type

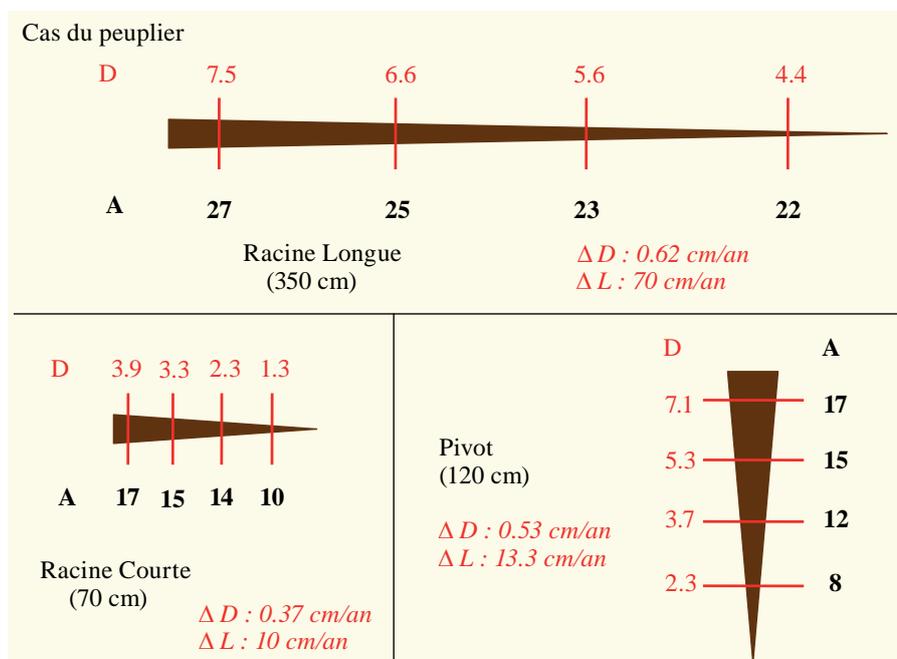
Des variations de la vitesse de croissance sont aussi observées selon le type de racines (Figure 10).

On retrouve les trois types de racines chez les six espèces étudiées, à l'exception des pivots qui sont de taille réduite voire inexistants chez les érables et les robiniers.

La Figure 10 illustre ces types de racine chez le peuplier. Ces trois exemples révèlent des différences de croissance en longueur importantes entre les racines longue, courte et pivotante.

La croissance en diamètre et la relation âge/diamètre ne sont pas très différentes chez les trois types de racines. C'est surtout l'allongement (ou croissance en longueur), qui diffère ; les Pivots et les Courtes étant relativement proches (13,3 et 10 cm/an) par rapport aux racines Longues (70 cm/an) de peuplier.

Figure 10 - Vitesse de croissance chez 3 types de racines chez le peuplier. D : Diamètre (cm) ; A : Age (année) ; ΔD : Croissance en diamètre ; ΔL : Croissance en longueur.



III - DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La vitesse de croissance racinaire dépend de différents paramètres de contrôle (Fayle, 1968) parmi lesquels l'espèce et les conditions environnementales (substrat, variations météorologiques ou climatiques, accès à l'eau). Il apparaît dans ce travail que les dimensions des racines et la relation âge/diamètre dépendent aussi du type de racine et de la distance au collet.

L'importance des matériaux ressort clairement : dans les matériaux grossiers et pauvres (dominés en proportions variables par des graviers, galets ou blocs), les contraintes physiques empêchent le développement de nombreuses racines, les obligeant à contourner chaque obstacle ; par ailleurs, la pauvreté chimique et la faible capacité de rétention en eau de ces matériaux obligent

les arbres à prospecter très loin de leur souche pour se nourrir. Ces deux contraintes donnent des systèmes racinaires contrastés avec quelques grosses et très longues racines courant souvent à faible profondeur mais pouvant aussi pénétrer et traverser le corps de digue, combinées avec un nombre réduit de racines courtes obliques généralement très tortueuses et densément ramifiées. La présence d'un pivot significatif dépend de la possibilité d'accès à l'eau en profondeur. En cas d'eau disponible, ces pivots peuvent croître rapidement, bien plus vite que les autres racines (Chandioux *et al.*, 2005 ; Doirat *et al.*, 2003) comme le confirment les mesures réalisées au cours de ce projet. Ils peuvent poser des problèmes de sécurité après pourrissement

en créant de véritables trous verticaux dans la digue, d'une profondeur dépassant deux mètres. Dans les matériaux fins et riches (limons plus ou moins sableux ou argileux), les contraintes physiques sont faibles et l'alimentation de l'arbre peut se faire à proximité de la souche. Le système racinaire est donc plus homogène, envoyant des racines dans toutes les directions, y compris dans le corps de digue ce qui pose systématiquement un problème sécuritaire. Si on observe toujours une différence significative entre racines longues et peu ramifiées et racines courtes et fortement ramifiées, la différence de croissance en diamètre et longueur est moins marquée car le rôle d'alimentation de l'arbre est plus partagé. La relation âge/diamètre n'est pas très différente entre racines courtes et racines longues pour une espèce donnée. La plus grande croissance en longueur du deuxième type fait que le diamètre est plus important à grande distance de la souche. C'est ce qui rend les racines longues dangereuses lorsqu'elles pénètrent dans les digues. Les racines courtes sont moins dangereuses individuellement, mais elles peuvent être nombreuses et créer une destructuration importante du matériau à proximité et dans le prolongement de la souche.

Tous les arbres étudiés y compris les plus jeunes (15 ans) ont des racines dans les 4 classes de diamètre considérées, donc atteignant ou dépassant 10 cm, et constituent déjà une menace potentielle pour la sécurité des ouvrages. Les arbres âgés de plus de 20 ans peuvent avoir quelques racines beaucoup plus grosses (jusqu'à 30 cm de diamètre au collet). Celles-ci n'ont pas été prises en compte dans cette étude par manque de répétabilité. Il sera nécessaire de compléter l'échantillonnage dans une prochaine étape. De même, les différences de structure en raison du type de matériau devraient contribuer à la variabilité du rapport âge/diamètre pour les plus grosses racines longues. Cette différence ne pourra être démontrée, si elle existe, que par des mesures complémentaires.

Chez le robinier, qui se reproduit régulièrement de façon asexuée par drageons, une racine peut être reliée directement à plusieurs arbres du même âge ou d'âges différents. Étant alimentée par ces multiples individus, ce type de racine a une croissance plus rapide que des racines reliées à un seul arbre. Il arrive qu'une racine drageonnante soit plus grosse localement que le plus gros des troncs qu'elle porte, et qu'elle dépasse 15 m de longueur. Sa croissance en diamètre peut avoir fortement varié dans le temps si certains arbres ont été coupés, et s'être accélérée lorsque de nouveaux individus connectés se sont développés. Par contre, ces racines spéciales sont toujours traçantes et très superficielles et ne posent donc que rarement des problèmes de sécurité.

Pour le pin sylvestre dans notre cas, la croissance ralentit fortement avec l'âge, notamment à cause de la faible fertilité du substrat et de la rudesse du climat. Les variations temporelles sont inférieures à la marge

d'incertitude du modèle âge/diamètre. Un échantillon plus grand et plus diversifié est nécessaire.

La vitesse de croissance en diamètre des racines augmente avec la proximité du collet. Ceci pourrait s'expliquer par la diminution du nombre de ramifications alimentant la racine avec l'éloignement de la souche.

D'autres paramètres peuvent expliquer la variabilité entre racines de la relation âge/diamètre. Les racines trouvent individuellement des conditions différentes (accès à l'eau, types de matériaux, richesse nutritive), entre le haut, milieu et bas de digue suivant la direction où elles poussent. Donc des racines qui ont la même vitesse au départ quand elles sont jeunes peuvent diverger ensuite parce que l'une ira vers un milieu plus sec, l'autre vers une zone humide, l'une dans un matériau riche, l'autre dans des graviers stériles... D'autre part, chaque racine peut être plus ou moins radialement connectée à une partie du houppier de l'arbre et celui-ci avec le temps peut être déséquilibré par la concurrence avec d'autres arbres, ou par des accidents (casse de branches par vent ou neige...). Lorsque les arbres sont recépés, le système racinaire qui n'est plus que faiblement alimenté pendant plusieurs années (5-10 ans ou plus suivant les conditions et la vigueur des rejets) ralentit sa croissance. Pour les feuillus qui sont recoupés régulièrement sur les digues, ces inflexions peuvent être visibles sur les données brutes de largeurs de cernes. Elles conditionnent évidemment la relation âge/diamètre. Mais le recépage ne doit en aucun cas faire oublier que le système racinaire reste en place et continue sa croissance.

Enfin, certaines racines d'un arbre peuvent être localement fortement concurrencées par celles d'un autre arbre, ou par d'autres espèces (notamment herbacées pour les racines traçantes), alors que d'autres se développent plus librement sans concurrence. De ce fait, le développement individuel des racines peut être très variable et différent de la moyenne du tronc. D'ailleurs, il serait intéressant d'observer si les variations interannuelles de croissance peuvent être interdatées sur des racines appartenant à différents arbres, et si les racines enregistrent les signaux climatiques de la même façon que la partie aérienne et notamment le tronc (Heuzé *et al.*, 2009 ; Krause *et al.*, 1994).

L'âge de l'arbre évalué à la tarière de Pressler ou après abattage permet, dans le cas des résineux et des feuillus de franc-pied, d'appréhender l'âge des plus vieilles racines que le système racinaire puisse porter et donc le diamètre potentiel de celles-ci. Dans le cas des feuillus qui ont été recépés une ou plusieurs fois, il est nécessaire de prendre en compte l'âge de la souche parfois beaucoup plus élevé que ne le laisse supposer le ou les rejets. En l'absence de documents de gestion ou de recours à une interdatation dendrochronologique avec des arbres vivants voisins, cette estimation de l'âge de la souche est difficile ou impossible visuellement. C'est alors l'âge d'une des plus

grosses racines qui peut donner le renseignement, bien que celles-ci soient souvent creuses ou pourries dans le cas de vieilles souches. Comme globalement une relation âge/diamètre des racines semble exister pour une espèce donnée, la partie manquante pourrait être datée à l'aide de cette relation. L'imprécision relative n'est pas ici un handicap pour la gestion car le danger apparaît pour des racines d'assez faibles dimensions, donc beaucoup plus jeunes que celles qui peuvent poser problème sur les vieilles souches. Ces dernières sont toujours dangereuses, et ont parfois des racines bien plus grosses que les troncs qu'elles portent.

Ce travail constituait une étude préliminaire sur un échantillon réduit. Il montre qu'il existe une relation âge/diamètre des racines et qu'elle peut être évaluée sommairement à partir du rapport âge/diamètre du tronc. Mais elle doit tenir compte de très nombreux paramètres de l'environnement et ne peut en aucun cas être généralisée. A ce stade, aucun modèle unique, même par espèce, n'est envisageable. Par contre, un

échantillon de taille suffisante, représentatif de nombreuses combinaisons des contraintes d'environnement, permettrait de dégager l'influence de ces divers paramètres et leurs interactions. Les seuils critiques pour la gestion devront, de plus, prendre en compte la dimension de l'ouvrage qui influence le niveau de risque pour un système racinaire donné. En effet une racine de gros diamètre est plus dangereuse dans des matériaux cohésifs ou sur une digue étroite que dans des matériaux graveleux ou sur une digue large.

Cet outil mérite donc d'être développé en intégrant les paramètres précédemment énoncés afin d'aider les gestionnaires à la prise de décision. Il s'agirait d'un système expert plus que d'un modèle à proprement parler, et qui nécessiterait une bonne connaissance du sujet par les utilisateurs. Même si l'intervalle de confiance du ratio âge/diamètre est assez large, cette relation mise dans son contexte pourrait être suffisante pour un usage opérationnel, où les limites critiques sont ajustées avec un fort coefficient de sécurité.

BIBLIOGRAPHIE

- CHANDIOUX O., VENNETIER M., ESTEVE R., RIPERT C., 2005. Étude de la végétation des digues du Rhône : Étude des systèmes racinaires. Cemagref, Aix en Provence, 9 p.
- DOIRAT G., RIPERT C., 2003. Étude du plan de gestion de la végétation arborée des digues de l'Isère. Cemagref, Aix en Provence, 76 p.
- FAYLE D.C.F., 1968. Radial Growth in Tree Roots - Distribution, Timing, Anatomy. Faculty of Forestry, Toronto, 184 p.
- GÄRTNER H., SCHWEINGRUBER F.H., DIKAU R., 2001). Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19, 1, 81-91.
- HEUZÉ P., DUPOUEY J.-L., SCHNITZLER A., 2009. Radial growth response of Hedera Helix to hydrological changes and climatic variability in the Rhine floodplain. *River Research and Applications*, 25, 393-404.
- KRAUSE C., ECKSTEIN D., 1994. Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia*, 11, 9-23.
- MÉRIAUX P., ROYET P., 2007. Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes - A practical handbook for owners and operators. 162 p.
- MÉRIAUX P., VENNETIER M., AIGOUY S., HOONAKKER M., ZYLBERBLAT M., 2006. Diagnostic et gestion de la végétation sur les digues et barrages en remblai. Commission Internationale des Grands Barrages, Comptes rendus du 22^e congrès, Barcelone, 1-19.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1982. Anatomie microscopique du bois. Institut Fédéral de Recherche Forestière, Zurich, 220 p.
- VENNETIER M., RIPERT C., CHANDIOUX O., MÉRIAUX P., DOIRAT G., 2005. Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. *Ingénieries EAT*, n° spécial, 3-14.
- ZANETTI C., 2007. L'enracinement des arbres dans les digues : Morphologie des systèmes racinaires - relation avec l'érosion. Cemagref - Université de Provence, 1, 68.
- ZANETTI C., VENNETIER M., MÉRIAUX P., ROYET P., DUFOUR S., PROVANSAL M., 2008. L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ingénieries EAT*, 53, 49-67.

LE COUVERT FORESTIER MARQUEUR SPATIO-TEMPOREL DE L'ACTIVITÉ D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN

THE FOREST: AN EFFICIENT SPATIO-TEMPORAL BIOINDICATOR OF LANDSLIDE ACTIVITIES

JEROME LOPEZ SAEZ ¹, LAURENT ASTRADE ², CHRISTOPHE CORONA ¹,
MARKUS STOFFEL³, FREDERIC BERGER ¹, PHILIPPE SCHOENEICH ⁴

¹ Cemagref UR EMGR, 2 rue de la Papeterie, B.P. 76, F 38402 Saint Martin-d'Hères cedex.

² Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, campus scientifique, F 73376 Le Bourget du Lac cedex.

³ Laboratoire de dendrogéomorphologie, Institut de géologie, Université de Berne, Baltzerstrasse 1 + 3, CH 3012 Berne.

⁴ Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 14 bis avenue Marie Reynoard, F 38100 Grenoble.

Contact: jerome.lopez@cemagref.fr

RÉSUMÉ

Les arbres enregistrent, à partir d'un certain seuil d'intensité, de durée ou de récurrence, les processus géomorphologiques et hydrologiques qui entraînent des perturbations physiques sur leur habitat ou des dommages mécaniques directs sur leurs troncs. Tout phénomène suffisamment perturbant pour l'arbre laisse donc une trace perceptible dans les caractéristiques de ses cernes de croissance ou dans des anomalies morphologiques visibles comme le bois de réaction qui a une structure cellulaire différente qui est clairement visible lors de l'extraction d'un échantillon. Dans cette étude, la présence de bois de réaction est utilisée pour identifier et reconstituer les événements passés dans le temps et dans l'espace. Nous avons reconstitué l'activité de quatre glissements de terrain dans les Alpes françaises du Sud en utilisant le couvert forestier comme témoin silencieux de l'activité des glissements de terrain. Soixante quinze *Pinus uncinata* endommagés par l'activité géomorphologique ont été échantillonnés permettant ainsi d'identifier 139 perturbations anatomiques. Au final, 6 périodes d'activités entre 1947 et 2004 ont été clairement identifiées.

La dendrogéomorphologie, qui s'articule autour de l'utilisation de l'arbre comme véritable marqueur ou bio-indicateur de l'instabilité de versant, est une solution qui offre des perspectives en matière de compréhension des phénomènes ainsi que des chroniques de l'activité des mouvements de terrain.

MOTS-CLÉS : GLISSEMENT DE TERRAIN, DENDROGEOMORPHOLOGIE, CERNE DE CROISSANCE, BIO-INDICATEUR.

ABSTRACT

Trees produce reaction wood when they are exposed to geomorphological and hydrological processes like snow avalanches, floods or landslides that lead to changes of the tree position, of the growth conditions or to direct mechanical damage. This wood has a different cell structure that is clearly visible when extracted from a tree. In this way trees record, from a certain threshold of intensity, duration or recurrence, geomorphological and hydrological processes that lead to disturbances in their environment. Consequently the identification of zones of reaction wood in tree stems can be used to identify previous disturbance and to reconstruct the triggering events in time, space and intensity. In this study we reconstructed the activity of four landslides in the Southern French Alps by using the forest cover on the landslide body as a silent witness of the past. We assessed the growth disturbances related to landslide activity of 75 damaged *Pinus uncinata* trees. In total we identified 139 growth disturbances that indicate 6 different periods of landslide activity between 1947 and 2004 although only one event was clearly identified by historical records. Besides, this study shows that dendrogeomorphological methods are innovative techniques offering perspectives for a better understanding of natural hazards.

KEYWORDS: LANDSLIDES, DENDROGEOMORPHOLOGY, TREE RINGS, BIOINDICATOR.

INTRODUCTION

La dendrogéomorphologie, subdivision de la dendrochronologie, est utilisée pour étudier et dater les processus géomorphologiques passés. Cette approche a été développée dès les années 1970 par Alestalo (1971) puis précisée par Shroder (1978). Elle fournit des méthodes pour reconstituer des événements passés tels que les avalanches (Rayback, 1998), les laves torrentielles (Bollschweiler *et al.*, 2008), les mouvements de glaciers (Giardino *et al.*, 1984) et les chutes de blocs (Stoffel et Perret, 2006). Elle repose sur l'identification de perturbations de croissance – cicatrices, rejets, étiage... – à l'origine de la formation de cernes diagnostics de densité anormale. Ce bois, nommé bois de réaction, est facilement identifiable car il est formé d'un xylème anormal, de couleur jaune ou brun rouge, court, à cellules denses et à cloisons épaisses. Le tissu résultant présente de façon générale une forte densité.

Les processus géomorphologiques tels que les glissements de terrain exercent diverses contraintes sur les arbres qui peuvent être observées macroscopiquement. Lors d'une déstabilisation, l'arbre réagit en se courbant pour regagner son état d'équilibre. La production de bois de réaction est généralement immédiate après une déstabilisation (Shroder, 1978). Elle est décalée d'une année si celle-ci a lieu après la période de croissance de l'arbre. Ainsi, le principe de l'analyse dendrogéomorphologique se fonde sur l'identification des phases de formation de bois de réaction et d'asymétries de croissance des cernes, ainsi que de périodes de plus forte ou de plus faible croissance (Figure 1).

De ce bois de réaction, de nature différente entre les conifères et les feuillus (bois de compression pour les premiers, bois de tension pour les seconds) résulte une asymétrie de croissance des cernes entre l'amont et

l'aval du tronc (cernes larges et bois de réaction dans la partie tendue du tronc pour les conifères, cernes larges à l'intérieur de la courbure pour les feuillus) qui provoque la courbure de l'arbre. L'excentricité de la largeur des cernes entre les deux parties est très utile pour l'analyse dendrogéomorphologique. Cette production de bois de réaction peut durer plusieurs années selon l'intensité du basculement. Par ailleurs, l'analyse de la courbure de l'arbre et de la localisation du bois de réaction dans le tronc par rapport à la pente générale du versant permet de préciser la nature du glissement. Lorsque le glissement est rotationnel, l'arbre va basculer vers l'amont et produire du bois de réaction sur la partie amont du tronc. Lorsque le glissement est translationnel, le phénomène est inversé, l'arbre bascule vers l'aval et produit du bois de réaction sur la partie aval du tronc. En général, l'utilisation du bois de réaction est un très bon indicateur des phases d'activité des processus géomorphologiques et de leur fréquence car l'arbre a la capacité de répondre à plusieurs épisodes.

La dendrogéomorphologie permet donc d'utiliser les arbres comme marqueurs ou témoins silencieux de l'instabilité du milieu, par interprétation des anomalies de croissances décrites ci-dessus. Shroder (1978) utilise le terme de « process-event-response » (Figure 2) pour décrire les effets des processus géomorphologiques sur la croissance d'un arbre.

Dans cette étude nous proposons d'identifier et de dater les perturbations de croissances de 75 *Pinus uncinata* vivants situés sur le glissement de terrain du Bois Noir (Figure 3) afin de reconstruire les périodes d'activités du glissement et de spatialiser l'extension des événements.

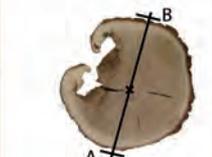
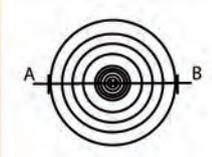
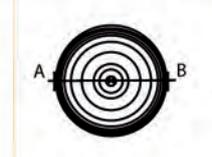
| Type de glissement de terrain | Glissement de terrain rotationnel | Glissement de terrain translationnel | Tout type de glissements de terrain | Tout type de glissements de terrain | Glissements de terrain de type coulée |
|-------------------------------|---|---|---|--|---|
| |  |  |  |  |  |
| | Basculement de l'arbre vers l'amont Perte de la verticalité basale | Basculement de l'arbre vers l'aval Perte de la verticalité basale | Impact mécanique Blessure | Élimination de la concurrence Modification des conditions de croissance | Asphyxie Étranglement du tronc perturbation de la croissance |
| Réponse anatomique de l'arbre | Excentricité des cernes, bois de réaction | Excentricité des cernes, Bois de réaction | Bourrelet cicatriciel | Formation de cernes larges | Cernes étroits, absents, voire mort de l'arbre |
| |  |  |  |  |  |

Figure 1 - Principales réactions anatomiques d'un arbre soumis à l'aléa glissement de terrain.

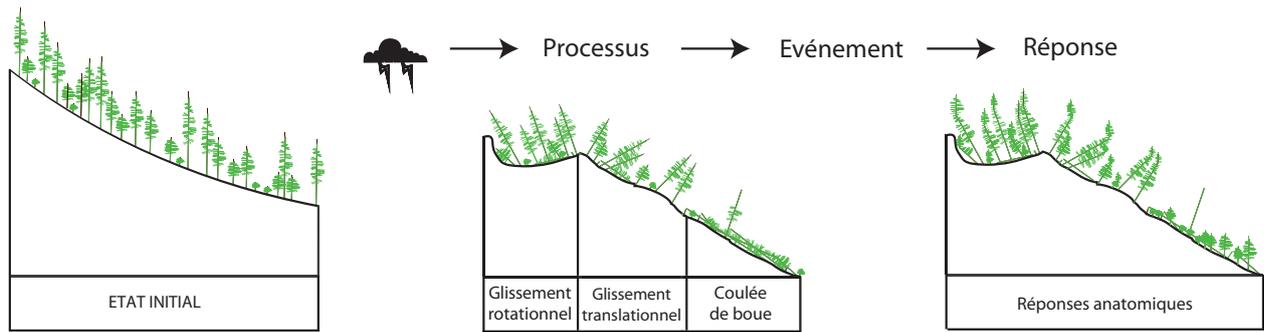


Figure 2 - Schéma de réponse d'un peuplement forestier face à l'aléa glissement de terrain.

I - SITE D'ETUDE

Le bassin de Barcelonnette situé dans les Alpes-de-Haute-Provence est connu pour ses affleurements de marnes noires callovo-oxfordiennes, ses paysages de « badlands » et ses formations glaciaires et péri-glaciaires. Il est le siège de nombreux « mouvements de versant » dont les plus connus sont les glissement-coulées de La Valette, Super Sauze et Poche (Figure 3). Si ces phénomènes spectaculaires font l'objet de recherches et ont été parfois médiatisés, les versants dégagés dans les marnes noires subissent d'autres modifications morphologiques par des instabilités de versants de plus faibles ampleurs : mouvements superficiels de types rotationnel et/ou translationnel. Le glissement de terrain du Bois Noir est situé sur la commune

de Jausiers dans la vallée de l'Ubaye. Ce secteur est caractérisé par une topographie accidentée, recouverte principalement par une forêt de conifères et de prairies pour une altitude allant de 600 m à 1700 m. C'est un secteur très fortement influencé par les mouvements de versant (Flageollet *et al.*, 1999).

Le bassin versant du Bois Noir est affectée par les glissements de types rotationnels et/ou translationnels. Ces types de mouvements de masse sont peu profonds allant de 2 m à 6 m de profondeur. Ils sont situés sur les pentes douces, dans les zones de discontinuité hydrologiques qui sont causés par le contact entre les dépôts de moraine et le substratum rocheux des marnes noires (Thiery *et al.*, 2007).

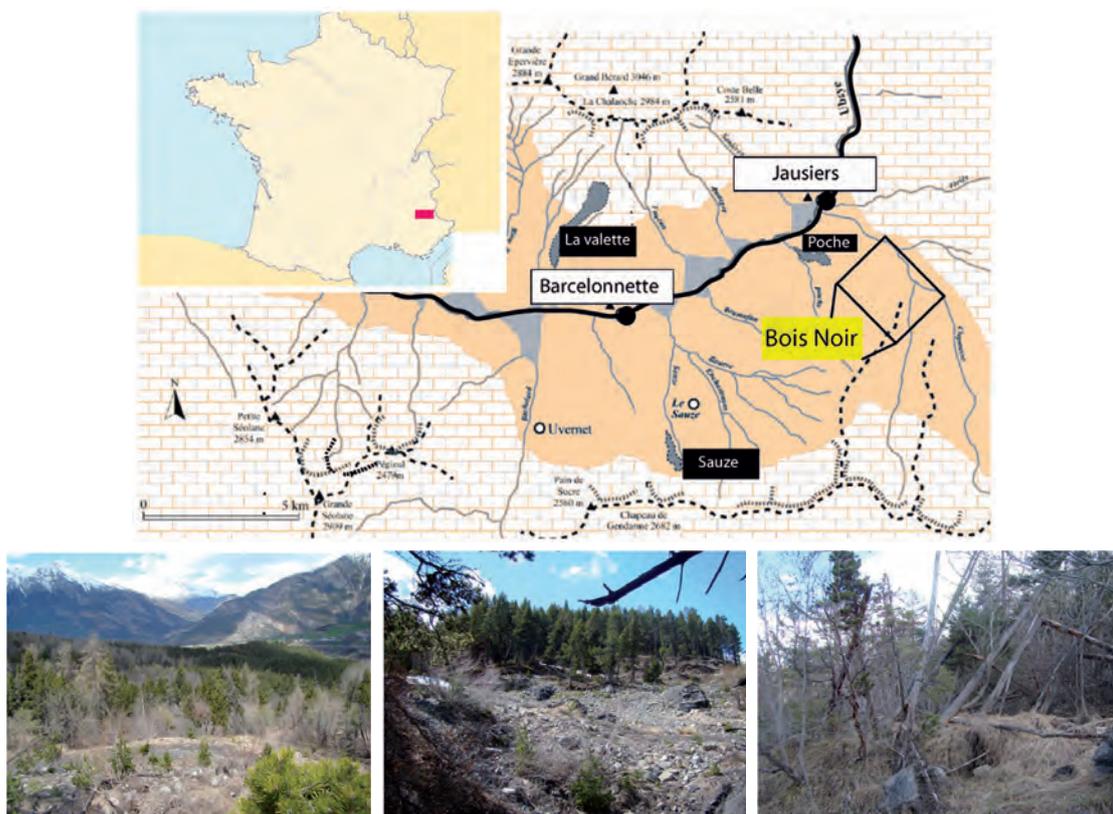


Figure 3 - Bassin versant de Barcelonnette, localisation du secteur du Bois Noir et différentes vues du glissement de terrain du Bois Noir.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'analyse des données LIDAR a permis d'identifier 4 glissements de terrain dans la zone d'étude (Figure 4). Grâce à la présence de la forêt sur le glissement de terrain, il est possible d'utiliser la méthode dendrogéomorphologique (Figure 3). La datation des mouvements de masse est basée sur l'identification des bois de réaction. Ce type de perturbation anatomique peut ainsi être détecté et daté avec précision en utilisant une analyse dendrochronologique. Un arbre incliné essaie toujours de retrouver sa position verticale en produisant, dans le cas d'un conifère, un bois de réaction facilement reconnaissables dans la partie tendue du tronc.

Dans cette étude, un échantillonnage exhaustif a été privilégié. L'intégralité des arbres présents sur le corps et en bordure des quatre glissements a été sondé. Au total, 75 *Pinus uncinata* ont été échantillonnés. Afin de détecter la présence éventuelle de bois de réaction, quatre sondages ont été pratiqués sur chaque arbre, deux perpendiculaires et deux parallèles à la ligne de plus grande pente (Reardon *et al.*, 2008). Les coordonnées GPS ont été enregistrées avec une précision inférieure à un mètre pour chacun des arbres sondés à l'aide d'un GéoExplorer Trimble. En complément de la position, des données supplémentaires ont été recueillies, comme la physionomie de l'arbre (présence de perturbations anatomiques visibles) et quelques données dendrométriques (hauteur totale de l'arbre, diamètre,). En supplément des arbres perturbés, une vingtaine d'arbres ne présentant aucune perturbation géomorphologique ou anthropique mais uniquement influencés par les conditions climatiques du milieu ont été sondés en dehors des

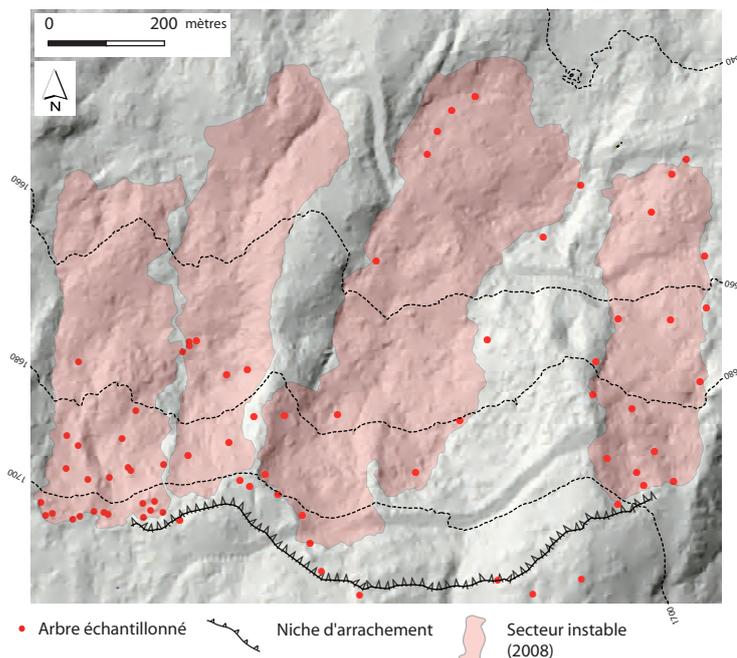


Figure 4 - Modèle numérique de terrain du secteur du Bois Noir, position de l'ensemble des arbres échantillonnés et localisation des 4 glissements de terrain.

secteurs instables. Cet échantillonnage a pour but d'obtenir une série de référence chronologique climatique pour le secteur étudié. Les échantillons obtenus dans cette étude ont été préparés suivant les procédures dendrochronologiques classiques (Braker, 2002). Chaque échantillon a été poncé, collé sur des plaquettes de lecture permettant ainsi une mesure optimale de la largeur de chaque cerne en utilisant une table de mesure numérique LINTAB d'une précision de 0,01 mm. L'ensemble des séries chronologiques a été traité au moyen du logiciel TSAP-WIN 3.0 (Rinntech).

III - RÉSULTATS

1 - Structure d'âge du peuplement

L'analyse de toutes les carottes montre une distribution uniforme de l'âge (l'âge de l'arbre à hauteur de poitrine, 1,3 m) allant de 50 à 149 ans avec une moyenne d'âge de 100 ans. Toutefois, compte tenu de la répartition spatiale des arbres, dans chacun des quatre glissements de terrain, un décalage d'âge apparaît (Figure 5). Par exemple, dans les parties inférieures de L1 (glissement 1) et L2 (glissement 2), tous les arbres ont entre 50 et 84 ans. Ceci indique une recolonisation du secteur à partir des années 1920 et 1950. Cette répartition spatiale homogène du secteur aval, suggère une influence directe du processus géomorphologique de type coulée de boue, représentatif de ce type de glissement complexe. Pour L3 (glissement 3) et L4 (glissement 4), la

présence de feuillus (exclus de l'échantillonnage pour des raisons de difficultés de lecture de cernes) dans la partie inférieure ne permet pas de connaître la répartition spatiale de l'âge du peuplement. Toutefois, les arbres les plus jeunes sont situés dans les parties amonts. Le fonctionnement de la niche d'arrachement s'avère beaucoup plus actif sur L3 et L4 compte tenu de l'âge de la population sur ce secteur.

2 - Perturbations de croissances et reconstruction minimale des événements passés

Au total, 139 perturbations anatomiques de croissance (PAC) ont été identifiées à partir des 284 échan-

tillons exploitables. Les résultats montrent que, en plus du glissement de terrain enregistré en Avril 1993 par le RTM (Thiery et al., 2007), cinq autres événements ont eu lieu entre 1947 et 2008 (Figure 6).

3 - Répartition spatiale des événements passés

Les localisations géographiques des arbres présentant un PAC pour une année identifiée ont été cartographiées pour les 6 événements reconstruits sur le site du Bois Noir pour la période 1947-2008 (Figure 7). Cette approche spatiale permet de comprendre le fonctionnement interne du glissement de terrain. Ainsi pour chaque année, une cartographie de la distribution spatiale des arbres perturbés montre une répartition spatiale différente entre les quatre glissements de terrain.

En 1947, 1977, 1993 et 2000, les répartitions spatiales des arbres perturbés sont homogènes. Pour ces années, le mouvement de masse est généralisé sur le site du Bois Noir (L1, L2, L3, L4). Toute-

fois, une période d'instabilité s'est produite en 1963 et plus récemment en 2004 uniquement sur le secteur L1 et L4.

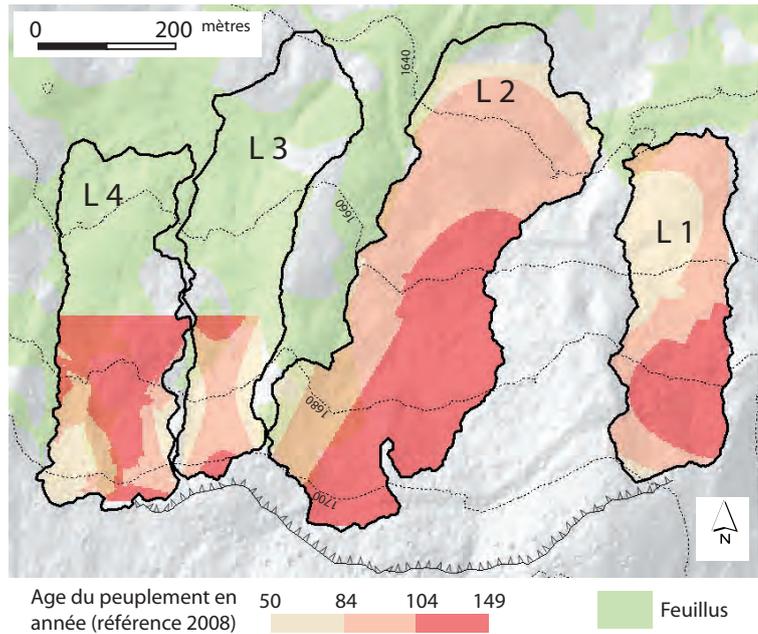


Figure 5 - Structure de l'âge du peuplement de Pinus uncinata, secteur du Bois Noir.

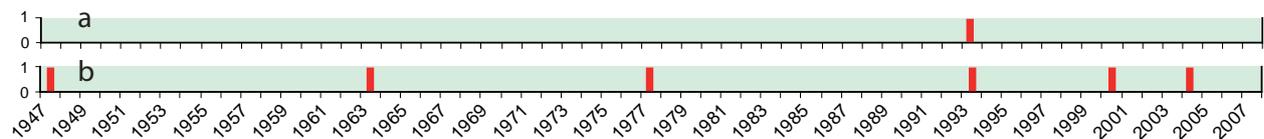


Figure 6 - Reconstruction de la fréquence minimale du glissement du Bois Noir :
 a) 1993, seule date avérée d'activité par les services RTM ;
 b) Chronique dendrogéomorphologique à partir du Pinus uncinata.

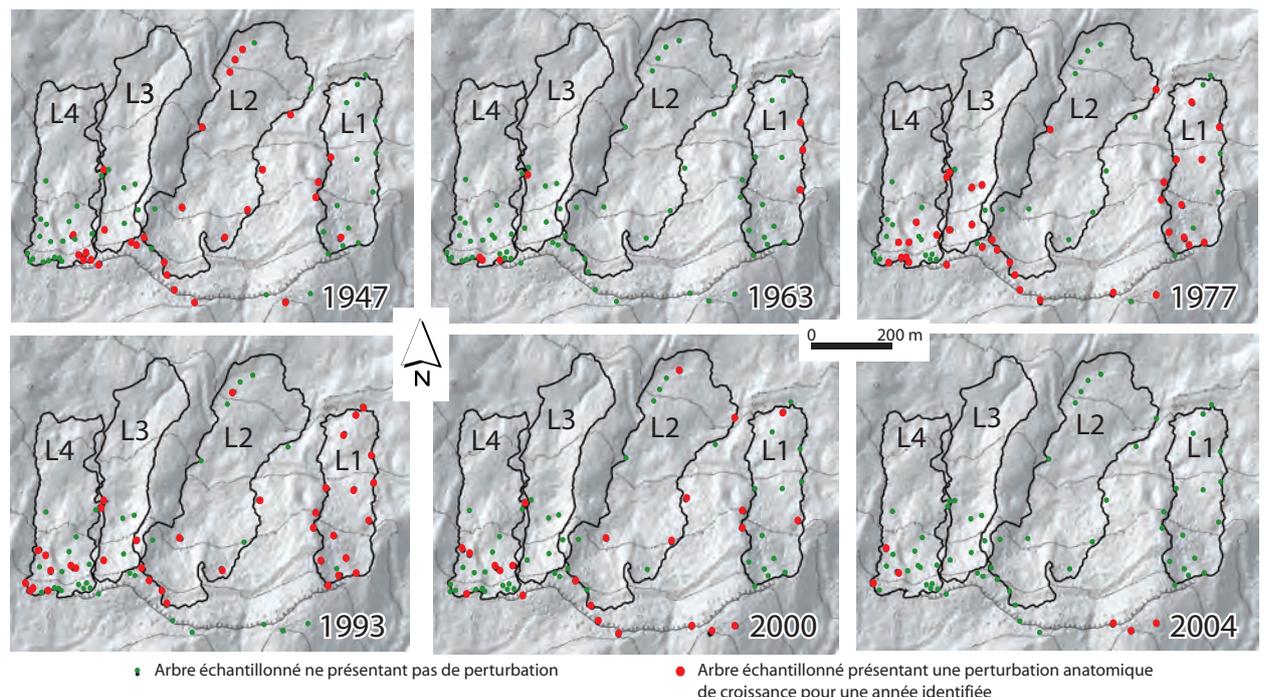


Figure 7 - Glissement du Bois Noir : répartition spatiale des arbres présentant des PAC pour les années 1947, 1963, 1977, 1993, 2000 et 2004.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Entre 1947 et 1993, le laps de temps entre les quatre événements enregistrés est relativement constant (en moyenne 11 ans). Toutefois, à partir de 1993, la fréquence des événements augmente. En 2004, les zones actives se situent plutôt dans les parties supérieures des glissements de terrain près d'une niche d'arrachement secondaire. Les arbres se situent en amont des trois glissements, dans un secteur où la présence d'une niche d'arrachement secondaire est visible. Cela pourrait indiquer un recul prochain de la niche principale, signe annonciateur d'une nouvelle étape de l'activité du mouvement de versant.

L'utilisation de l'arbre comme bio-indicateur a permis de reconstituer cinq dates supplémentaires d'instabilité du versant en plus de celle connue dans les archives. On obtient également une fréquence d'activité, paramètre indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement des mouvements de versant. La cartographie des arbres permet de spatialiser les résultats dendrogeomorphologiques dans le but de

fournir des informations sur la dynamique des différents processus géomorphologiques et notamment le type de glissement, rotationnel et/ou translationnel.

A ce titre-là, l'arbre s'avère être un témoin de l'activité géomorphologique d'un milieu. Sa croissance est directement influencée par une multitude de facteurs. La dendrogeomorphologie permet d'extraire ces informations pour mieux comprendre le fonctionnement des processus géomorphologiques.

Cette méthode présente l'avantage d'être faible en coût et en moyens proposant ainsi une nouvelle approche en terme d'expertise de l'aléa glissement de terrain. Cette faculté d'enregistrement est un élément essentiel dans la reconstitution spatio-temporelle, qui à l'heure actuelle est l'une des faiblesses des méthodes d'expertises. Prendre en compte le couvert forestier offre donc des perspectives nouvelles en matière de gestions des risques naturels car la compréhension du passé est souvent la clé de l'avenir.

Remerciements

Cet article a été effectué dans le cadre du projet de recherche *Dendrogliss co-financé par la Fondation MAIF et le Cemagref de Grenoble*. Il s'inscrit directement dans un projet de thèse qui s'articule autour de l'utilisation de l'arbre comme marqueur silencieux de l'activité de glissement de terrain. Un grand merci également à l'Université de Strasbourg et notamment Jean-Philippe Malet pour l'acquisition des données cartographiques et LIDAR du secteur du Bois Noir.

BIBLIOGRAPHIE

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-139.
- BRAKER O.U., 2002. Measuring and data processing in tree-ring research – a methodological introduction. *Dendrochronologia*, 20, 203-216.
- BOLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., BOURQUI K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree physiology*, 28, 255-263.
- FLAGEOLLET J.-C., MAQUAIRE O., MARTIN B., WEBER D., 1999. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars Basins, Southern French Alps, France. *Geomorphology*, 30, 65-78.
- GIARDINO J.R., SHRODER J.R., LAWSON M.P., 1984. Tree-ring analysis of movement of a rockglacier complex on Mount Mestas, Colorado, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 16, 299-309.
- RAYBACK S.A., 1998. A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical Geography*, 19, 502-515.
- REARDON B.A., PEDERSON G.T., CARUSO C.J., FAGRE D.B., 2008. Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glaciers National Park, Montana, USA. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40, 148-160.
- SHRODER J.F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9, 168-185.
- STOFFEL M., PERRET S., 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia*, 24, 1-15.
- THIERY Y., MALET J.-P., STERLACCHINI B., PUISSANT A., MAQUAIRE O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, 92, 38-59.

DENDROCHRONOLOGIE EN RIPISYLVE DES CERNES AUX CHANGEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES DANS LES SYSTEMES FLUVIAUX

DENDROCHRONOLOGY ON RIPARIAN FOREST

FROM TREE-RING TO HYDROMORPHOLOGICAL CHANGES ON RIVER SYSTEMS

LAURENT ASTRADE¹, SIMON DUFOUR²

¹ *Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, F 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.*

² *Laboratoire LETG/COSTEL, Université Rennes 2/CNRS, Place Recteur Henri le Moal, F 35000 Rennes.*

Contact : laurent.astrade@uni-savoie.fr

RÉSUMÉ

Les végétaux riverains et les peuplements alluviaux sont des indicateurs de l'état des conditions locales et de la dynamique passée des cours d'eau. La reconnaissance des réponses des arbres aux perturbations hydrologiques (crue, inondation, abaissement de nappe,...) et morphologiques (érosion, sédimentation,...), des forêts de versants jusqu'aux arbres de la ripisylve, et leur datation à partir des cernes permettent de reconstituer la chronologie, l'intensité et la répartition spatiale des événements et des changements passés. L'objectif de cette contribution est de montrer les différentes applications de la dendrochronologie (dendrohydrologie et dendrogéomorphologie) dans l'étude des systèmes fluviaux et lacustre pour la reconstitution à haute résolution des événements extrêmes et des évolutions hydromorphologiques à long terme.

MOTS-CLÉS : *HYDROSYSTÈME, DENDROCHRONOLOGIE, RIPISYLVE, CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX.*

ABSTRACT

The riparian plant and the alluvial stands are indicators of the local conditions state and of the streams past dynamic. The trees answers recognition to the hydrological and morphological disturbances (flood, phraetic decline...) and their dating thanks to tree-ring, allow to reconstitute the chronology, the intensity and the spatial distribution of the events and the past changes. The objective of this contribution is to show the various implementations of dendrochronology (dendrohydrology and dendrogeomorphology) in the study of streams for the high-resolution reconstruction of extreme events and of long-term evolutions.

KEYWORDS: *HYDROSYSTEM, DENDROCHRONOLOGY, RIPISYLVE, ENVIRONMENTAL CHANGES.*

INTRODUCTION

L'arbre est un organisme qui réagit aux changements des conditions qui l'entourent et qui enregistre, dans les caractéristiques de ses enveloppes annuelles de bois ou dans des anomalies morphologiques visibles, la chronologie des événements qui l'affectent. L'observation de la très grande capacité des végétaux ligneux à réagir à des stress exogènes liés aux perturbations affectant leur milieu de croissance a montré l'intérêt de l'analyse de ces réactions pour évaluer les événements (Alestalo, 1971). La dendrochronologie a ainsi permis le développement d'approches et de méthodologies fructueuses dans les sciences de l'environnement (climatologie, écologie, géomorphologie, hydrologie) (Schweingruber, 1988).

L'application à l'étude des hydrosystèmes de la dendrochronologie, des versants jusqu'aux arbres riverains, permet l'étude à haute résolution des événements extrêmes et des évolutions hydromorpholo-

giques à long terme (Astrade et Bégin, 2002 ; Dufour et Piégay, 2007). Cette approche repose sur le fait qu'un événement, d'origine climatique ou anthropique, agissant dans le bassin versant ou directement dans le chenal, peut entraîner des modifications, brutales ou non, réversibles ou pas, des conditions hydrogéomorphologiques. Le stress subi par l'arbre, lié à des dommages mécaniques directs et/ou à la perturbation physique de l'habitat, entraîne, à partir d'un certain seuil, soit la mort de l'individu, soit, sur les arbres qui survivent, des réponses visibles extérieurement dans leur morphologie (cicatrice, changement d'axe, rejet) et/ou des anomalies de leurs cernes (bois de réaction, largeur, anatomie). La reconnaissance de ces dommages et leur datation à partir des cernes permettent de reconstituer la chronologie, l'intensité et la répartition spatiale des événements voire de changements passés.

I - LA RÉPONSE DES ESPÈCES LIGNEUSES AUX CHANGEMENTS HYDROLOGIQUES ET MORPHOLOGIQUES

En milieu alluvial, les apports en eau de la nappe et du chenal deviennent prépondérants sur les précipitations (Willms *et al.*, 1998). Or dans les hydrosystèmes, la répartition spatiale des flux d'eau évolue constamment, à court terme et à long terme, en réponse à des contrôles naturels et anthropiques structurants ; la dynamique des compartiments « chenal » et « nappe » de l'hydrosystème est un moteur essentiel de contrôle de l'évolution de la croissance ligneuse par la modification des conditions d'alimentation en eau (Dufour, 2007).

1 - La réponse des espèces

Au plan physiologique, il a été montré, chez certaines essences de saules et de peupliers, qu'une baisse du niveau de la nappe se traduit par une réduction du potentiel hydrique dans la tige et donc par une baisse de la conductance stomatique et, corrélativement, par une réduction à la fois de l'activité photosynthétique et de la croissance (Horton *et al.*, 2001). Cette constatation permet d'identifier les seuils en termes de réponse des espèces et de changement de la communauté. Ainsi, Lite et Stromberg (2005), dans les ripisylves de la rivière San Pedro (Arizona), ont identifié un seuil de variation hydrologique (baisse de la nappe) qui favorise le tamarix dans les communautés pionnières normalement dominées par des saules et des peupliers.

Au niveau des réponses spécifiques, les approches quantitatives se sont essentiellement concentrées sur le contrôle hydrologique, notamment suite à la

construction d'un barrage régulateur provoquant l'abaissement de la nappe à l'aval et la réduction de l'amplitude des variations hydrologiques (Rood et Mahoney, 1990). L'impact de l'altération du régime hydrologique a ainsi été essentiellement étudié dans des situations hydro-climatiques fortement contrastées dans lesquelles l'eau devient rapidement un facteur limitant au cours de la saison de croissance : pour des climats secs, et généralement en tête de bassin, où le manque d'eau, les années à faible pluviosité, affectent fortement la croissance (Scott *et al.*, 2000) ; ou à l'inverse, sur les marges de rivières à faible énergie, notamment en climat sub-tropical, avec de longues périodes d'inondation durant lesquelles l'excès d'eau contrôle la croissance (Teskey et Hinckley, 1977).

Sur les cours d'eau de zones tempérées, l'impact des modifications des conditions d'alimentation en eau a également été traité, en termes de croissance, sur le Danube (Smelko et Scheer, 2000), et de morphologie ligneuse sur la Saône (Astrade et Bégin, 1997, Figure 1) : les peupliers (*Populus tremula* L.) montrent un enregistrement net (et réversible) des crues tardives dans la largeur de leurs cernes de croissance, alors que pour le chêne (*Quercus robur* L.), les contrastes s'expriment dans la taille et la répartition des vaisseaux, à la fois entre les sites échantillonnés (selon l'exposition des arbres aux inondations), et entre les cernes des séries chronologiques, selon les années présentant des inondations tardives (en particulier 1983).

L'activité morphologique et l'évolution de la géométrie du chenal exercent également un contrôle sur la croissance. L'effet de changements brutaux comme

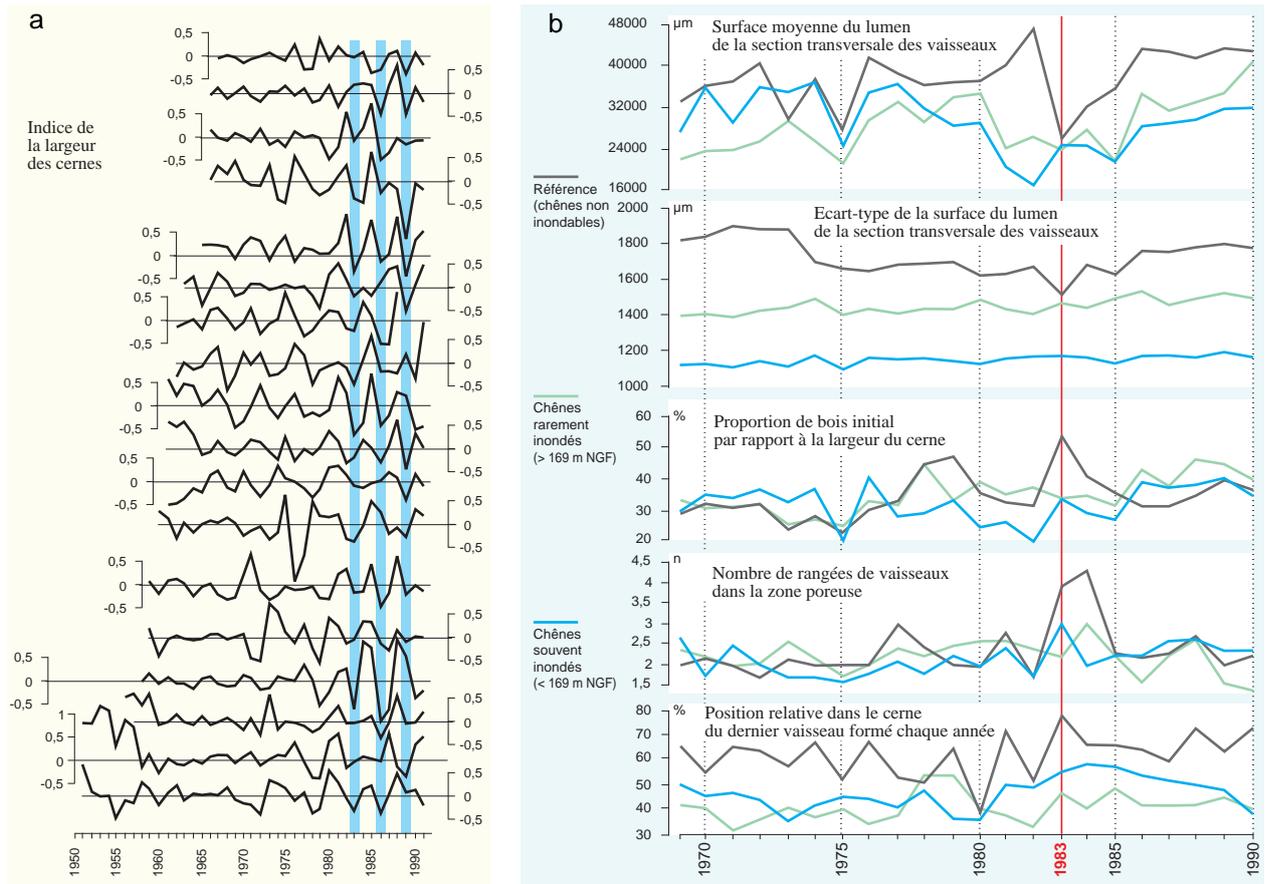


Figure 1 - Réponses de la végétation riveraines aux inondations tardives de la Saône : a) largeur des cerne de croissance des peupliers ; b) taille et distribution des vaisseaux chez le chêne ; c) les cerne de 1982 et 1983 (Astrade et Bégin, 1997) ; d) inondation des arbres du site d'étude en 1996 (photo L. Astrade) ; e) inondation de 1983 à Dracé (photo Service de la Navigation).

par exemple l'incision rapide d'un chenal du fait d'extractions de granulats (Amlin et Rood, 2003) ou la mise à nu des systèmes racinaires par érosion latérale (Lamarche, 1966) a ainsi été démontré. L'incision progressive du chenal peut également affecter la croissance de certaines espèces comme le frêne (Dufour et Piégay, 2008).

2 - Ampleur, vitesse et réversibilité de la réponse des espèces alluviales

Pour un peuplement donné, l'agencement des formes fluviales est fondamental, car il régit dans l'espace les niveaux topographiques et le degré de connexion au chenal et à la nappe (Pautou, 1984). Mais la géométrie d'un chenal est rarement stable et les déplacements du lit mineur au sein de la plaine sont susceptibles de modifier significativement ce patron topographique et donc hydrologique. Ainsi, l'incision d'un cours d'eau est-elle à l'origine d'une réduction de la fréquence des inondations, donc d'un assèchement progressif des stations adjacentes au cours d'eau avec une évolution de la composition floristique au profit des espèces les moins hygrophiles. Mais si les effets qualitatifs sont bien connus, l'impact quantitatif sur les individus et les communautés reste encore en grande partie à évaluer. Trois éléments sont alors à prendre en considération : l'ampleur de la modification, la brutalité de la modification, la réversibilité du phénomène.

L'ampleur de la modification renvoie à la notion de seuil de réaction. Par exemple, dans les forêts riveraines de l'Ain, une baisse de la croissance du frêne est observée (Figure 2) lorsque, suite à l'enfoncement du chenal, les boisements se retrouvent à plus de 1,7 m au-dessus du chenal et que, en conséquence, ils ne sont plus inondés que pour des débits importants (supérieur à 1000 m³/s) (Dufour, 2007). Ce type de

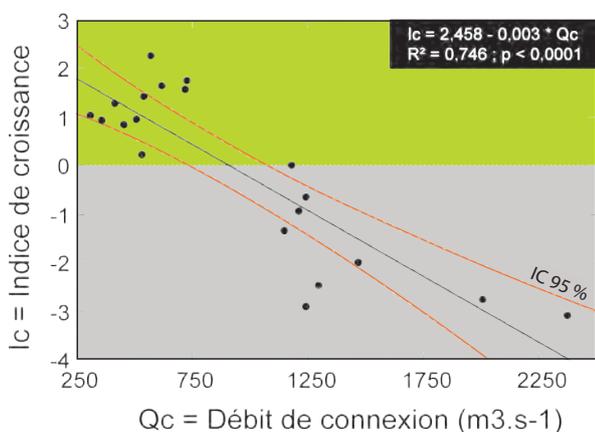


Figure 2 - Croissance du frêne entre 1992 et 2002 (somme des indices de croissance) selon le niveau de connexion de la placette avec le chenal, la rivière Ain (Dufour, 2005).

seuil a également été mesuré en rapport avec le taux de mortalité d'une espèce nord-américaine de peuplier (*Populus fremontii*) par Scott *et al.* (2000) : ils enregistrent des mortalités significativement plus fortes lorsque l'incision dépasse 1,5 m. L'effet de l'abaissement de la nappe et de l'incision sur la mortalité a également été mesuré par Steiger *et al.* (1998) sur la Garonne et par Chalamont (1989) sur le Rhône. Les travaux de ce dernier et de Pautou *et al.* (1992) montrent que la forte mortalité du saule blanc, suite à une baisse de 1,6 à 1,8 m de la nappe, s'accompagne d'une explosion démographique du peuplier noir et donc d'une profonde modification de la trajectoire évolutive du peuplement. Ainsi, dans certains cas, l'ampleur du changement est-elle aussi importante que la profondeur absolue atteinte par la nappe ou le chenal (Shafroth *et al.*, 2000). Par exemple, l'étude de la croissance radiale du frêne des forêts riveraines du Rhône (Dufour, 2007) montre la diversité de la réponse biologique aux évolutions complexes des conditions hydrologiques depuis 50 ans (incision du chenal, aménagements hydro-électriques et dérivation des débits, pompes industrielles dans la nappe phréatique) en fonction de la situation initiale des peuplements. Sur le site de l'île de la Platière (entre Lyon et Valence, Figure 3), la placette 2, la plus influencée par les pompes, enregistre une baisse significative de la croissance, alors que sur la placette 1, les frênes voient leur croissance augmenter aussi significativement ; la baisse du niveau d'eau suite à la dérivation a, en fait, créé des conditions moins hydromorphes plus favorables au frêne.

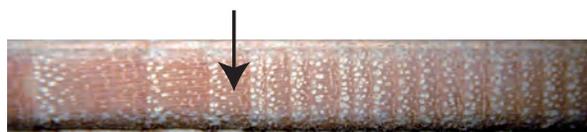


Figure 3 - a) Réduction de la largeur des cernes de croissance d'un frêne suite à la baisse brutale de nappe (pompage industriel).

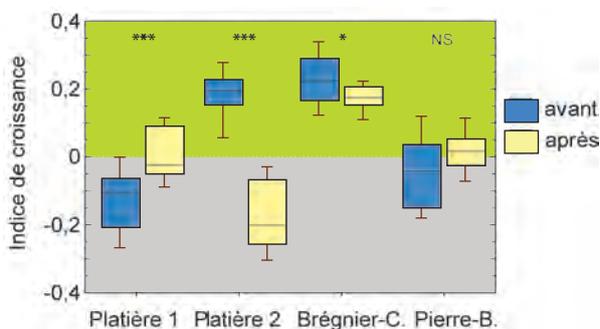


Figure 3 - b) Comparaison de la croissance du frêne sur les sites du Rhône avant et après la dérivation des débits (Dufour, 2005).

*** = différence très significative ;

* = significative ;

NS = non significative.

La réponse des espèces à des événements (extraction, crue) modifiant brusquement le niveau de nappe est variable. Elle est par exemple plus atténuée ou plus lente à se manifester en milieu tempéré chez une espèce post-pionnière comme le frêne que chez des essences pionnières en milieu plus sec et en bord immédiat de cours d'eau pour lesquelles les liens avec le débit et/ou les précipitations sont plus marqués (Stromberg et Patten, 1996). Les fortes épaisseurs de sédiment dans les unités post-pionnières et les étiages relativement abondants jouent également un rôle de tampon en matière d'alimentation en eau qui modère la réponse aux événements soudains.

Enfin la réversibilité de l'impact d'une modification des conditions de milieu se pose avec force, notamment dans le cadre des actions de gestion et de restauration des corridors riverains.

3 - Les facteurs de contrôle de la croissance ligneuse en milieu alluvial

La dynamique des peuplements forestiers résulte d'une conjonction complexe de facteurs de contrôle qui gouvernent la répartition de l'eau et son évolution au cours du temps (exemple pour le frêne, Figure 4). L'agencement des formes fluviales est fondamental car il régit les niveaux hydrologiques. L'altitude de la placette et sa position dans la géométrie fluviale contrôle en grande partie son degré de connexion. De fait, les frênes colonisant des placettes faiblement connectées subissent un stress créé par la faible dispo-

nibilité en eau, ils enregistrent donc des croissances inférieures à celles des placettes plus proches du chenal ou topographiquement plus basses.

La structuration du substrat est également un facteur important. Des mesures réalisées sur la prospection racinaire du frêne en milieu alluvial (Dufour, 2005) mettent en évidence un double contrôle au niveau du substrat d'une station : un contrôle édaphique (horizon compact ou impénétrable) et un contrôle hydrologique (nappe permanente ou semi-permanente). Dans le cas d'une baisse du niveau d'eau, cela peut entraîner la libération d'un volume disponible pour le développement des racines mais inversement, dans le cas d'une nappe déjà située sous le niveau de galet, un blocage de l'allongement des racines (Figure 5) ; ainsi, sur les formes fluviales enregistrant une très faible sédimentation, le volume colonisable par les racines sera trop faible pour assurer, à la fois, une bonne stabilité mécanique et une bonne alimentation en eau.

En termes de gestion des corridors riverains, l'exemple du frêne illustre l'importance d'un diagnostic hydro-morphologique dans la définition des stations écologiques. C'est une essence forestière possédant de bonnes propriétés mécaniques et un potentiel commercial important ; cependant, pour que ce potentiel puisse s'exprimer, le frêne exige des conditions de croissance optimales. Ainsi, des cernes d'une largeur de 0,4 à 0,7 cm donnent un bois d'une excellente qualité pour l'usinage et le tranchage, alors qu'une taille plus réduite se traduit par une moindre résistance. De plus, l'irrégularité des accroissements entraîne une perte de la qualité et de la valeur.

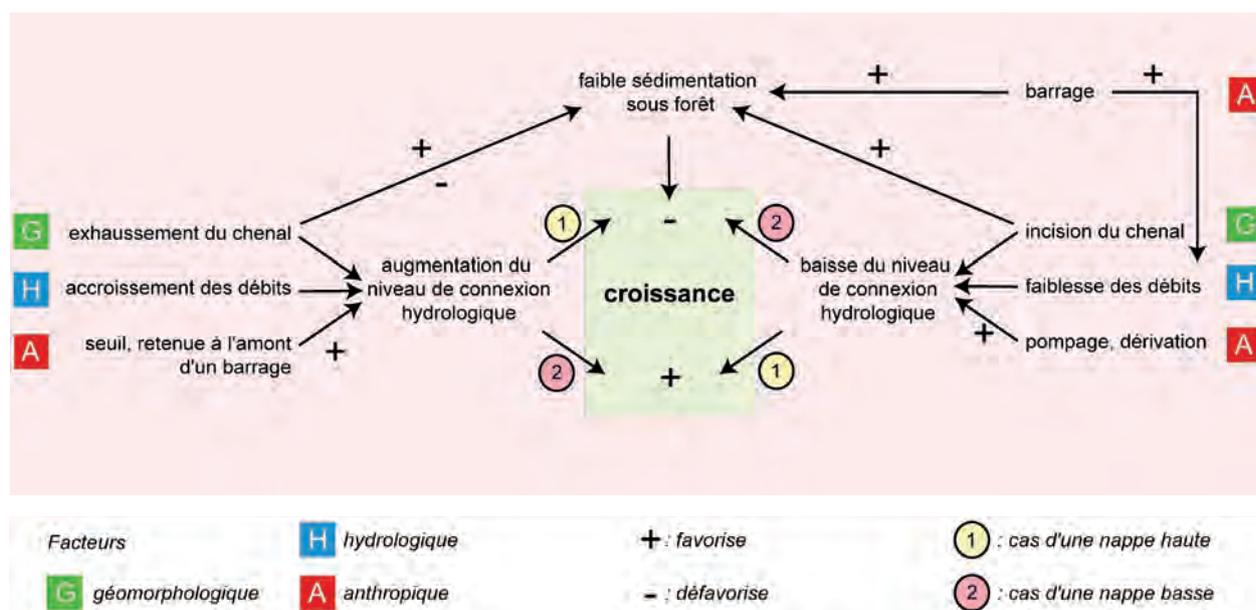


Figure 4 - Exemple d'interactions complexes entre facteurs de contrôle : modèle conceptuel simplifié des facteurs de contrôle de la croissance ligneuse en milieu alluvial (note : les interactions biologiques ne sont pas figurées) (Dufour, 2005).

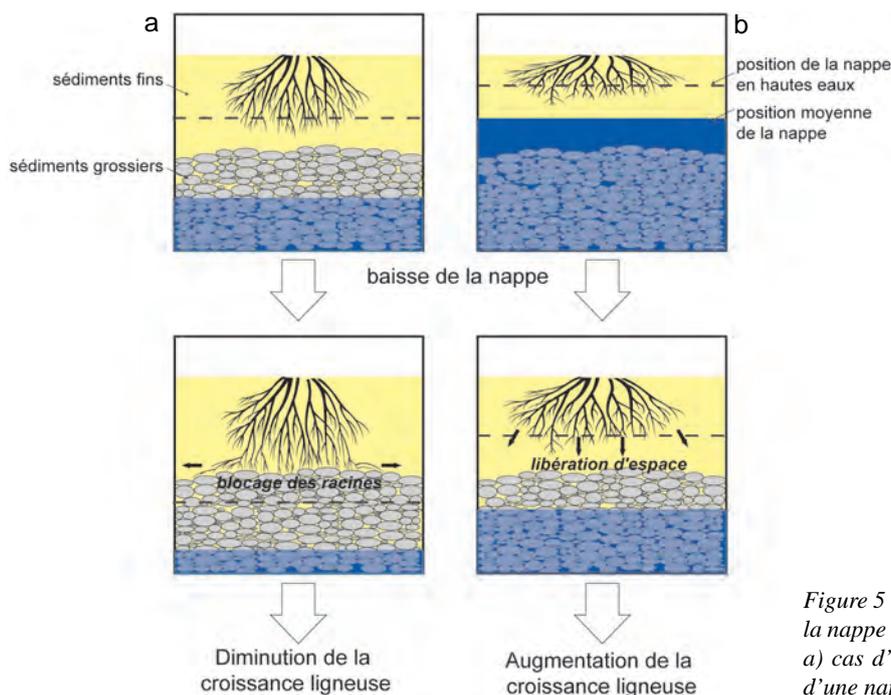


Figure 5 - Influence de l'évolution du niveau de la nappe sur la répartition des racines de frêne, a) cas d'une nappe relativement basse, b) cas d'une nappe haute (Dufour, 2005).

II - L'ARBRE COMME MARQUEUR DES CHANGEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES

1 - A l'échelle du bassin versant : le couplage versant/lit

L'approche hydrologique consiste à établir la relation quantitative entre la croissance des arbres sur un bassin versant et les précipitations (Stockton et Boggess, 1980). Sous réserve d'une corrélation significative, le prolongement de l'enregistrement du régime des précipitations vers le passé est possible au moyen de fonctions de transfert. Dans les régions où l'eau est un facteur limitant la croissance, tout événement pluvieux augmentant l'écoulement peut, parallèlement, avoir un effet favorable sur la croissance. C'est le cas des régions semi-arides, où la trilogie croissance des arbres, précipitations et débits de rivières est d'un synchronisme révélateur (Helley et Lamarche, 1973). Toutefois, cette approche est difficilement applicable dans les régions où les stress hydriques ne sont pas les seuls facteurs limitants.

L'approche sédimentaire, plus directe et plus évidente, peut être réalisée par l'étude des mouvements de versants (glissement, coulée, écroulement, avalanche) qui sont des sources de sédiments importantes, pouvant entraîner des discontinuités morphologiques dans le lit fluvial, bloquer le courant, provoquer des inondations, etc. Cette analyse peut s'appuyer sur la végétation, la dendrogéomorphologie permettant d'affiner la connaissance de la cinématique de ces mouvements, dans l'espace et dans le temps. Un travail de ce type a été réalisé dans les Alpes du Sud sur les deux sources sédimentaires majeures du torrent du Bez (glissement de Ravel-et-Ferriers et coulées de Bonneval-en-Diois)

Il a permis de connaître les épisodes actifs de recharge sédimentaire des cours d'eau associés aux sites (Astrade *et al.*, 1998).

2 - A l'échelle des berges : crues et évolutions hydromorphologiques

a - Reconstitutions hydrologiques : crues, changement de régimes et mise en eau

Il s'agit de mettre à profit les liens directs entre la nappe d'eau et la croissance des arbres pour cette fois dater des débordements ou des fluctuations durables et de comprendre les modalités du développement des ripisylves (Hupp, 1988). Le régime des perturbations alors susceptibles d'influencer les arbres riverains peut être décrit par quatre paramètres :

- l'amplitude des crues : dans le cas des crues entraînant des débris (bois, glace...), la hauteur maximale des marques d'abrasion sur les arbres marque l'amplitude atteinte par les hautes eaux (Bégin et Payette, 1988). L'abrasion du cambium secondaire des tiges produit une cicatrization par l'ajout de cernes annuels dans la zone épargnée du tronc en marge de la blessure, dont le dénombrement permet la datation. Un travail en cours sur le Lignon de Haute Loire à l'aval du barrage de Lavalette montre l'amplitude et la propagation longitudinale des crues liées aux lâchers d'eau du barrage (vannes et évacuateur de crue) sur les 5 km court-circuités du cours

d'eau (Astrade, en cours).

- la durée de l'immersion : une fois inondée, la rhizosphère est privée des échanges gazeux nécessaires à l'assimilation de plusieurs éléments essentiels, ce qui entraîne donc des conditions de stress. La réaction est habituellement l'augmentation de la porosité chez les espèces au bois à zones poreuses (*Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*), une forte densité du bois chez les gymnospermes (*Picea*, *Larix*, *Abies*, *Pinus*) et la fabrication de cernes étroits chez la majorité des espèces. Un travail sur les rives du réservoir Robert-Bourassa (Québec) retrace, après la mise en eau en 1978, la mortalité et la croissance des pins nouvellement riverains (mortalité qui s'étale sur 5 ans), la mise en place d'un gradient de végétation en une décennie et une recolonisation en direction du rivage à partir de 1988 suite à une rupture durable dans le régime du réservoir (Astrade et Bégin, en cours) ;
- la fréquence des crues : une haute fréquence d'inondation peut limiter l'activité assimilatrice de l'arbre, en le privant fréquemment des échanges gazeux essentiels, ou peut paradoxalement stimuler la croissance en assurant l'alimentation épisodique de la rhizosphère en nutriments. Une fois les marqueurs dendrochronologiques des crues bien identifiés selon les espèces, leur datation permet l'analyse de la fréquence des événements perturbateurs survenus depuis l'établissement des arbres ;
- le moment de l'année où survient la crue : l'inondation est par nature épisodique et l'arbre qui en

est le témoin ne risque de livrer que les événements ayant produit des stress durant la saison de croissance et de façon suffisamment intense (Astrade et Bégin, 1997).

b - Reconstitutions morphologiques : érosion et modelage riverain

Cette approche exploite les réactions des arbres à des processus géomorphologiques riverains liés à la puissance de l'écoulement et/ou aux fluctuations du plan d'eau. Le courant, les vagues, les élévations ou abaissement durables des lignes d'eau entraînent l'érosion ou l'enfouissement du substrat forestier, le recul de talus d'érosion ou, à l'extrême, le décapage complet des surfaces. Les effets des perturbations sont alors bien visibles : arbres morts, arbres inclinés par suite du déchaussement de leurs racines, troncs enfouis sous les alluvions, branches brisées, amas de débris ligneux. Le stress subi par l'arbre suscite une réponse, matérialisée habituellement par le développement de structures adaptatives qui lui confèrent une forme irrégulière (Figure 6). Les arbres peuvent aussi être affectés sans que des bris mécaniques ne surviennent (déchaussement des racines, enfouissement de la tige, érosion du substrat). Dans ce cas, si l'événement a produit un stress, l'arbre présentera une réaction par une variation de productivité qui peut se lire dans la largeur de ses cernes annuels ou dans l'anatomie du bois. L'évolution de la rive est le résultat observable du cumul d'événements dont l'influence peut être retracée aux plans spatial et temporel à l'aide des arbres affectés, selon leur âge et leur position.

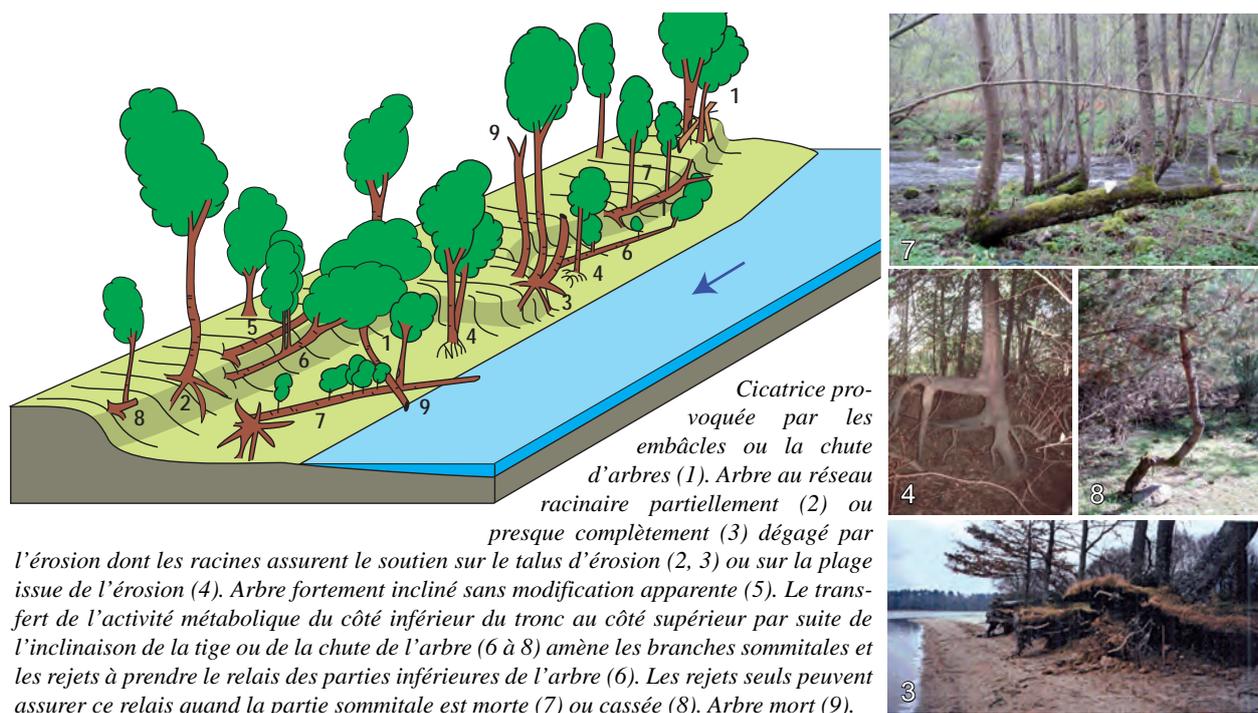


Figure 6 - Typologie des formes de croissance des arbres en réponse à l'érosion riveraine (Astrade, 1996).

Un travail réalisé par exemple sur des îles de la Saône (Astrade, 1996) montre les changements de la dynamique hydromorphologique et des conditions de croissance de la ripisylve depuis les années 1980, suite à des crues majeures et aux changements des conditions d'écoulement dans le bassin versant (urbanisation, gestion des digues, changement du régime des pluies). Sur le lac artificiel de St-Pardoux (Limousin), l'étude des arbres riverains a permis d'évaluer l'intensité et le rythme du modelage des rives après sa mise en eau en 1976 (Maleval et Astrade, 2003), montrant que les marges de la cuvette lacustre se sont façonnées principalement pendant les quatre premières années d'existence du lac pour atteindre leur état d'équilibre et leur allure actuelle après une décennie.

c - A l'échelle des plaines : datations paléoenvironnementales et réponses fluviales

L'utilisation de la végétation comme outil de datation est maintenant relativement classique en géomorphologie fluviale, que ce soit par la datation des arbres subfossiles (Miramont, 1998) ou par la détermination de l'âge des arbres sur pieds (Fagot *et al.*, 1989). Ainsi les sites de fossilisation des vallées à affleurements marneux des Alpes du Sud sont l'objet d'études paléogéomorphologiques destinées à reconstituer l'histoire et la dynamique de l'érosion au cours de l'Holocène et du Tardiglaciaire (Miramont et Sivan, 2006). Les travaux en cours visent à travailler sur les anomalies de croissance de ces arbres subfossiles, comme le bois de réaction ou les cicatrices, pour croiser les informations

sur l'âge et sur la dynamique riveraine aux époques considérées.

La végétation en place permet de donner un âge aux paléofformes fluviales par la datation des arbres qui les colonisent (Heikkinen, 1994), et donc de reconstituer les étapes de la morphogenèse fluviale le long d'un profil. Cependant, trois précisions méthodologiques sont nécessaires :

- l'âge obtenu par la carotte ne reflète pas l'âge réel de l'arbre. Les prélèvements sont effectués le plus près possible du sol mais pas au niveau du collet de l'arbre afin de pouvoir librement tourner la sonde. Par conséquent, l'âge obtenu sur le prélèvement doit être corrigé par rapport à la hauteur d'échantillonnage ; la relation âge/hauteur est évaluée en mesurant les taux de croissance d'arbres de même espèce sur les sites étudiés ;
- pour pouvoir dater le début de la colonisation, l'âge recherché sur l'espace considéré est déterminé par l'arbre le plus vieux échantillonné. Celui-ci doit alors être considéré comme étant le premier d'une distribution continue et homogène de la population des âges ; toute valeur en position d'exception (due par exemple à une erreur d'échantillonnage liée à la difficulté parfois d'identifier sur le terrain les limites de la forme géomorphologique) doit être enlevée ;
- les dates obtenues sont celles de l'installation des arbres et non pas de la mise en place des paléofformes ; l'évaluation de l'écèse (délai entre la stabilisation du dépôt et la germination de l'arbre) est donc indispensable pour passer d'un

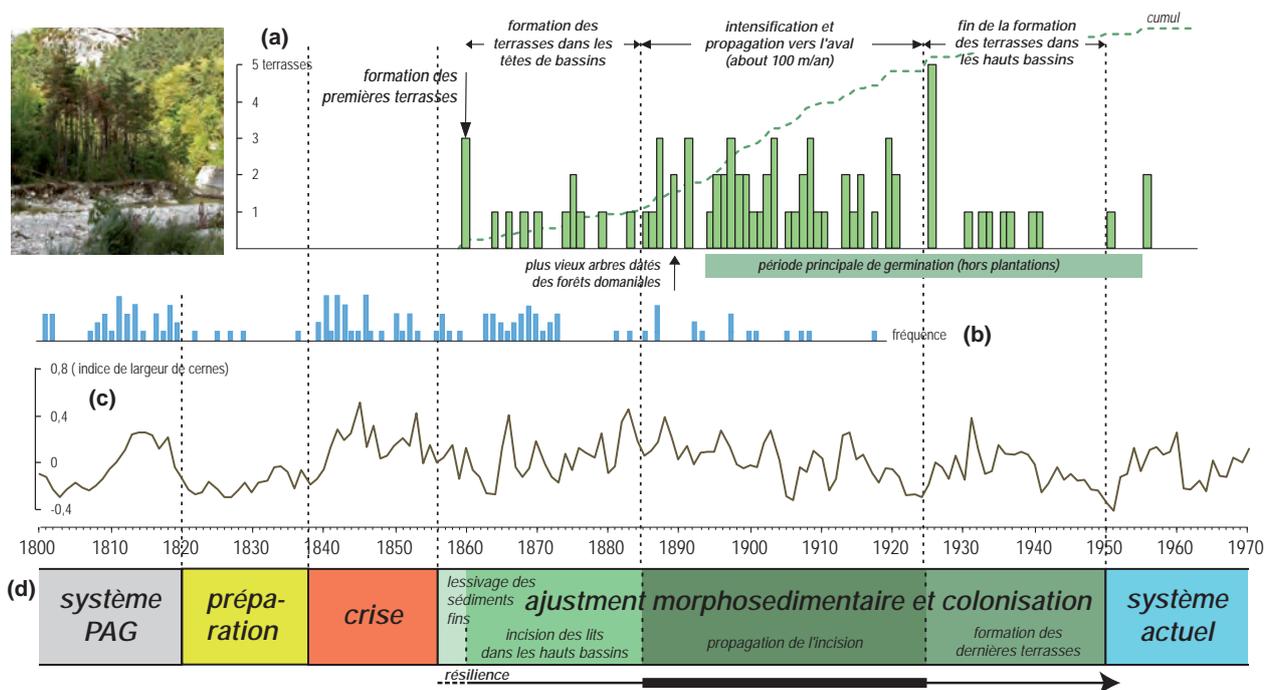


Figure 7 - Evolutions morphosédimentaires des rivières torrentielles dans le Haut-Diois/Haut-Buëch à la sortie du Petit Âge Glaciaire (tiré de Astrade, sous presse) : a) date de formation des terrasses ; b) fréquence des événements torrentiels ; c) série moyenne des largeurs de cerne de *Abies alba* (le Bois noir) ; d) synthèse chronologique.

âge minimum à un âge réel. Ce travail de calibrage peut être réalisé sur des formes récentes, à proximité, où l'évolution peut être observée sur des photographies aériennes.

Par exemple, la disparition du tressage torrentiel sous l'effet du tarissement des apports sédimentaires de versants caractérise l'évolution récente du paysage alluvial dans les Alpes du sud (Bravard, 2001). Le déficit d'apport en matériaux grossiers induit par la reconquête forestière des pentes se traduit par l'incision des lits torrentiels et par la formation de terrasses alluviales. Une végétation forestière constituée d'espèces pionnières de type mésoxérophile va s'installer rapidement sur ces terrasses, lorsque les nappes sont suffisamment profondes. En l'absence de données d'archive assez nombreuses et précises, cette végétation est utilisée pour reconstituer l'évolution morphologique des lits et la vitesse de propagation de l'incision. La datation dendrochronologique des terrasses qui se sont formées au cours du XIX^e et du XX^e siècle dans les montagnes

drômoises a ainsi permis de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle des changements fluviaux qui se sont produits depuis la fin du Petit Age Glaciaire sur les torrents de tête de bassins (Astrade *et al.* 2008, sous presse) et à l'aval (Liébault *et al.*, 2005). Couplée avec d'autres approches, elle apporte des précisions nouvelles sur la transition entre le PAG et les conditions actuelles (Figure 7) : identification d'une succession de phases dynamiques différentes (par exemple le rôle préparatoire de la sécheresse de 1830-1838 – marquée par l'absence de crue et par les séries de cernes étroits sur des vieux boisements – dans la crise torrentielle de 1855-1870) et un affinement de la chronologie (commencement très précoce de l'incision des lits ; propagation de l'incision vers l'aval à une vitesse de 60 à 150 m/an). Ces résultats mettent en évidence le rôle du climat (petites fluctuations hydroclimatiques), amplifié par une forte anthropisation, dans l'explication des rythmes de l'évolution des paysages et de la stabilisation relative de la fin du XIX^e siècle.

CONCLUSION

La végétation ligneuse présente sur les marges des systèmes fluviaux offre des perspectives nombreuses en associant recherche fondamentale (Astrade *et al.*, 2009) et aide à la gestion (Dufour et Piégay, 2006). Elle peut ainsi souligner les processus physiques régissant ces milieux, permettant d'apprécier le recul des berges, de dater l'âge des surfaces alluviales ou encore de quantifier la sédimentation fine. L'analyse des interactions entre la forêt alluviale et les écoulements peut amener à mieux comprendre les effets des différents régimes hydrologiques sur la croissance des végétaux et la régénération des espèces ou encore l'influence de la végétation riveraine sur les

écoulements. Les végétaux riverains sont ainsi des indicateurs de l'état des conditions locales et de leur dynamique passée. La compréhension des interactions forêt-chenal peut de fait permettre de répondre à certains enjeux de société qu'il s'agisse de la production forestière, de la préservation des ressources en eau et du patrimoine naturel, de la gestion des bassins versants et des risques naturels associés, ou encore de la restauration des plaines alluviales et des hydrosystèmes dégradés. Les approches dendrohydrologiques et dendrogeomorphologiques s'inscrivent pleinement dans ces travaux liant le chenal, le végétal, le climat et l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-140.
- AMLIN N.M., ROOD S.B., 2003. Drought stress and recovery of riparian cottonwoods due to water table alteration along Willow Creek, Alberta. *Trees*, 17, 351-358.
- ASTRADE L., 1996. La Saône en crue : dynamique d'un hydrosystème anthropisé, Thèse Doctorat Géographie, Université Sorbonne-Paris IV, 358 p.
- ASTRADE L., BRAVARD J.P., LANDON N., 1998. Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre : étude dendrogeomorphologique de deux sites de la de la vallée de Boulc (Diois, France). *Géographie Physique et Quaternaire*, 52 (2), 153-165.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saône river, France. *Ecoscience*, 4 (2), 232-239.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 2002. Utilisation de la dendrochronologie comme outil de diagnostic et d'évaluation du fonctionnement des hydrosystèmes. In RUFFINONI C., PIÉGAY H., PAUTOU G., Les ripisylves dans les hydrosystèmes fluviaux, éd. I.D.F.-C.N.R.S.
- ASTRADE L., CORENBLIT D., DUFOUR S., LE LAY Y.-F., LIÉBAULT F., PIÉGAY H., STEIGER J., 2009. La végétation ligneuse dans les systèmes fluviaux anthropisés : quelques avancées conceptuelles et méthodologiques récentes. In LAGANIER R., ARNAUD-FASSETTA G., Les géographies de l'eau : processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème, éd. L'Harmattan, 135-178 + biblio.
- ASTRADE L., JACOB-ROUSSEAU N., ALLIGNOÛ F., *sous presse*. Les successions d'interactions entre climat, sociétés et paysages dans un contexte de changement : les moyennes montagnes du Dios et des Cévennes à la sortie du petit âge glaciaire. In La géomorphologie alpine : entre patrimoine et contrainte, Colloque de la Société Suisse de Géomorphologie (SSGm), Olivone, 3-5 septembre 2009.

- BÉGIN Y., PAYETTE S., 1988. Dendroecological evidence of subarctic lake-level changes during the last three centuries in Subarctic Québec. *Quaternary Research*, 30, 210-220.
- BRAVARD J.-P., 2001. Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et des sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. 168^{ème} session du Comité scientifique et technique de la Société Hydrotechnique de France, colloque forêts et eau, Nancy, 6 p.
- CHALAMONT J., 1989. Deux indices prévisionnels de l'évolution démographique des populations de bois tendre, Salix après abaissement de la nappe phréatique. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I, 63 p.
- DUFOUR S., 2005. Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). Thèse de Géographie, Université Lyon 3.
- DUFOUR S., 2007. Contrôles hydro-morphologiques et activités anthropiques dans les forêts alluviales du bassin rhodanien, de la quantification des processus à la gestion des milieux. *Annales de Géographie*, 654, 126-146.
- DUFOUR S., PIÉGAY H., 2006. Forêts riveraines et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. *Revue Forestière Française*, LVIII, 4 : 339-350.
- DUFOUR S., PIÉGAY H., 2007. Changements fluviaux et forêts riveraines. In Forêt et eau, 13^e-21^e siècle, CORVOL A., éd. L'Harmattan, 323-338.
- DUFOUR S., PIÉGAY H., 2008. Geomorphological controls of *Fraxinus excelsior* growth and regeneration in floodplain forests. *Ecology*, 89, 1: 205-215.
- FAGOT P., GADIOLET P., MAGNE M., BRAVARD J.-P., 1989. Une étude dendrochronologique dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une métamorphose fluviale, *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 213-223.
- HEIKKINEN O., 1994. Using dendrochronology for the dating of land surfaces, in Beck C. éd., *Dating in Exposed and Surface Contexts*, Albuquerque, University of New Mexico Press, 213-235.
- HELLEY E.J., LAMARCHE V.C., 1973. Historic flood information for northern California streams from geological and botanical evidence, *Vegetation and Hydrologic Phenomena*, 2401-2414.
- HORTON J.L., KOLB T.E., HART S.C., 2001. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. *Ecological Applications*, 11, 4, 1046-1059.
- HUPP C.R., 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. In BAKER V.R., KOCHER C.R., PATTON P.C. ed., *Flood Geomorphology*. New York, Wiley and Sons, 335-356.
- LAMARCHE V.C., 1966. An 800 year history of stream erosion as indicated by botanical evidence. *Professional Paper USGS*, 550D D83-D86, 267 p.
- LIÉBAULT F., GOMEZ B., PAGE M., MARDEN M., PEACOCK D., RICHARD D., TROTTER C.M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications*, 21: 739-756.
- LITE S.J., STROMBERG J.C., 2005. Surface water and groundwater thresholds for maintaining *Populus-Salix* forests, San Pedro River, Arizona. *Biological Conservation*, 125, 2, 153-167.
- MALEVAL V., ASTRADE L., 2003. Le modelage d'une cuvette lacustre artificielle après son remplissage : quantification et chronologie de l'érosion des rives du lac de St-pardoux, limousin (France). *Revue de Géographie Alpine*, 91, 1, 29-40.
- MIRAMONT C., 1998. Morphogénèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la Moyenne Durance (Alpes françaises du Sud). Thèse de géographie physique, Université Aix-Marseille I, 286 p.
- MIRAMONT C., SIVAN O. 2006. Les paléoenvironnements fluviaux dans les Alpes du Sud : un exemple d'étude dendro-géomorphologique. pp. 71-72. In DUMONT A., BENOIT P., BERTHIER K., BILLAUD Y., BONNAMOUR L., BONNOT-DICONNE C., CARCAUD N., DUMONT A., HIRON X., MAGNY M., MARGUET A., PETREQUIN A.M., PETREQUIN P., VAXELAIRE L., *Archéologie des lacs et des cours d'eau*. Collection Archéologiques, éd. Errance. 166 p.
- PAUTOU G., 1984. L'organisation des forêts alluviales dans l'axe rhodanien entre Genève et Lyon ; comparaison avec d'autres systèmes fluviaux. *Documents de Cartographie Ecologique*, 27, 43-64.
- PAUTOU G., GIREL J., BOREL J.-L., 1992. Initial repercussions and hydroelectric developments in the French Upper Rhône Valley: A lesson for predictive scenarios, propositions. *Environmental Management*, 16, 2, 231-242.
- ROOD S.B., MAHONEY J.M., 1990. Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in western prairies: probable causes and prospects for mitigation. *Environmental Management*, 14: 451-464.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1988. *Tree rings : Basics and Applications of Dendrochronology*. Dordrecht, Kluwer, 276 p.
- SCOTT M.L., LINES G.C., AUBLE G.T., 2000. Channel incision and patterns of cottonwood stress and mortality along the Mojave River, California. *Journal of Arid Environment*, 44, 399-414.
- SHAFROTH P.B., STROMBERG J.C., PATTEN D.T., 2000. Woody riparian vegetation response to different alluvial water table regimes. *Western North American Naturalist*, 60, 1, 66-76.
- SMELKO S., L. SCHEER, 2000. Dendrochronological analysis of diameter growth and increment of pedunculate oak, *Quercus robur* L. in Danube floodplain forests. *Ekologia*, Bratislava, 19, 2: 125-140.
- STEIGER J., JAMES M., GAZELLE F., 1998. Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France. *Regulated Rivers: Research and Management*, 14, 1, 13-23
- STOCKTON C.W., BOGESS W.R., 1980. Tree rings : a proxy data source for hydrologic forecasting, Unified river basin management, American water Resources Association, Symposium Proceedings, May 4-7 1980, Gatlinburg, Tennessee, 609-624.
- STROMBERG J.C., PATTEN D.T., 1996. Instream flow and cottonwood growth in the eastern Sierra Nevada of California, USA. *Regulated River: Research and Management*, 12, 1-12.
- TESKEY R.O., HINCKLEY T.M., 1977. Impact of water level changes on woody riparian and wetland communities. Six volumes, FWS/OBS 77/58, 77/59, 77/60, 78/87, 78/88, 78/89, US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Service, Washington DC, USA.
- WILLMS J., ROOD S.B., WILLMS W., TYREE M., 1998. Branch growth of riparian cottonwoods: a hydrologically sensitive dendrochronological tool. *Trees*, 12, 215-223.

Incertitudes associées à la reconstruction de l'occurrence des avalanches par dendrogéomorphologie

JOMELLI V.¹, GERMAIN D.², GRANCHER D.¹,
PAVLOVA I.¹, BRUNSTEIN D.¹

¹Laboratoire de Géographie Physique
de Meudon, CNRS, Meudon.

² Université du Québec à Montréal, Canada.

Contact : jomelli@cnrs-bellevue.fr

RÉSUMÉ

La dendrogéomorphologie est classiquement utilisée pour documenter l'activité des avalanches de neige. Dans les régions où les observations historiques sont rares, la dendrogéomorphologie permet de reconstruire l'occurrence des avalanches sur plusieurs décennies à partir de la datation des dommages sur les arbres. Toutefois, cette reconstruction de l'occurrence demeure incomplète. Une grosse avalanche peut, par exemple, masquer les traces laissées par des événements antérieurs de plus faible amplitude. Quantifier les incertitudes associées à cette méthode est donc de toute première importance pour déterminer la pertinence de ces reconstructions. C'est à cette fin que nous avons comparé un

historique avalancheux établi à partir d'observations directes à une reconstruction de l'occurrence par dendrogéomorphologie. Cette comparaison a été réalisée pour deux couloirs sélectionnés sur la commune de Valloire (Alpes françaises). Les résultats montrent qu'entre 20 et 50% de l'occurrence avalancheuse échappent à l'analyse dendrogéomorphologique dans les couloirs considérés. Ce pourcentage dépend d'abord de l'activité avalancheuse. Cette perte augmente de manière non linéaire avec le temps en partie due à l'absence de relation significative entre le nombre d'arbres endommagés et le nombre d'avalanches. Pourtant, la plupart des années au cours desquelles des avalanches ont été observées, elles ont également été identifiées à partir de la dendrogéomorphologie. La localisation des arbres joue un rôle déterminant dans la qualité de la reconstruction. Plus de 60% de l'information provient de la zone d'arrêt car c'est dans cette zone que les arbres sont les plus endommagés. La qualité de l'information dépend également du type de dommage selon que l'on considère le bois de réaction ou les cicatrices d'impact. Le rapport signal sur bruit est supérieur pour les cicatrices. Ces résultats montrent que la qualité de la reconstruction dépend largement du site considéré. Ces résultats préliminaires devront donc être validés par une analyse conduite sur un plus grand nombre de couloirs.



Exemples de dommages causés aux arbres par une (des) avalanche(s) (photos V. Jomelli).



Figure hors-texte - Avalanche en milieu forestier, 19 janvier 2004, Abriès, Hautes Alpes (photo M. Chave).

Dendroarchéologie



Au recto :

En haut : charpente de la grange ovale de Saint-Eloy-les-Tuileries (19) avant restauration (photo C. Belingard).

En bas : enregistrement photographique des séries de cernes sur le chant d'un panneau peint. Anonyme flamand, Calvaire des Tanneurs, huile sur chêne, 73,00 x 143,25 cm, Bruges, cathédrale Saint-Sauveur (photo P. Fraiture).

DENDROCHRONOLOGIE DES CHARPENTES ET PLAFONDS PEINTS MÉDIÉVAUX EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

DENDROCHRONOLOGY OF MEDIEVAL CARPENTRY AND PAINTED CEILINGS IN THE MEDITERRANEAN AREA

FRÉDÉRIC GUIBAL¹, EMILIEN BOUTICOURT²

¹ Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, UMR 6116 CNRS, Université Paul Cézanne Aix-Marseille, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, Pavillon Villemain, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence Cedex 04.

² Laboratoire de Médiévisiologie Occidentale de Paris, UMR 8589 CNRS, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 1 rue Victor Cousin, F 75005 Paris.

Contact : frederic.guibal@univ-cezanne.fr

RÉSUMÉ

Les charpentes et plafonds de la région méditerranéenne française ne suscitent l'intérêt des spécialistes que depuis peu. Or, l'application conjointe de l'archéologie du bâti et de la dendrochronologie à l'étude des charpentes et plafonds de la région méditerranéenne française permet de répondre non seulement à des questions de nature chronologique mais aussi à des questions relatives au choix et à l'approvisionnement des bois utilisés. Une étude entreprise sur 16 édifices révèle l'originalité de la charpenterie méditerranéenne, montre que le sapin et, dans une moindre mesure, le mélèze sont les essences préférentiellement utilisées pour la réalisation de ces structures et contribue à la mise en place d'un nouveau référentiel représentatif du sapin sur la période allant du XI^e au XV^e siècle.

MOTS-CLÉS : DATATION, CHARPENTES, PLAFONDS PEINTS, MOYEN-ÂGE, RÉGION MÉDITERRANÉENNE.

ABSTRACT

Carpentry and ceilings of the French Mediterranean region have only recently interested specialists. Yet, associating of building archaeology and dendrochronology to studies of carpentry and ceilings of the French Mediterranean region makes it possible to answer on one hand to chronological questions, on the other hand to questions concerning timber selection and wood supply. A study carried out on 16 buildings evidences the originality of the Mediterranean carpentry and reveals a very large utilisation of fir timber and, to a lesser extent, larch timber. This study helps building up a new fir master chronology spanning the XI-XVc. period.

KEYWORDS: DATATION, CARPENTRY, PAINTED CEILINGS, MIDDLE AGES, MEDITERRANEAN AREA.

INTRODUCTION

Dans la région méditerranéenne française, les charpentes et les plafonds n'ont longtemps suscité qu'un intérêt très modéré chez les historiens et archéologues du bâti, faute d'éléments immédiatement identifiables dans ce type de structures. De fait, pendant longtemps, les publications n'ont accordé que rarement le moindre paragraphe aux charpentes et aux couvertures des bâtiments. La lecture des actes de la 143^e session du Congrès Archéologique de France (1985) dévolu au Pays d'Aix publiés par la Société Française d'Archéologie l'atteste : sur 20 articles relatifs à 18 édifices civils ou religieux, ni les charpentes ni les plafonds n'ont retenu l'attention des auteurs.

Longtemps délaissées dans la région méditerranéenne française en raison de l'emploi d'un matériau (bois) moins commun que celui de la pierre, non sans rapport avec la rareté apparente du matériau dans le milieu naturel, les charpentes anciennes en région méditerranéenne se révèlent pourtant plus nombreuses qu'on ne le supposait et présentent des originalités architecturales propres qui méritent largement l'intérêt que leur porte aujourd'hui une série d'études menées en Languedoc-Roussillon par le Service Régional de l'Archéologie (Jean-Louis Vayssettes) et une thèse de doctorat de l'un des co-auteurs (E.B.) sous la direction de Philippe Bernardi (UMR 8589).

La diversité des charpentes méridionales s'exprime non seulement dans la multiplicité des matériaux de couverture employés et des formes de toits qui leur sont associées, mais aussi dans celle des techniques de charpentes utilisées. En fait, les régions méridionales usèrent de techniques traditionnelles de la charpenterie et surent aussi développer des manières de couvrir originales, mieux adaptées à des conditions particulières d'approvisionnement en bois d'œuvre (Bernardi et Bouticourt, 2007). Par rapport au modèle septentrional dominant, l'originalité de la charpente méridionale repose sur la

nécessité de s'adapter à la pauvreté locale en bois de grandes dimensions et en bois de bonne qualité mécanique. Les poutres les plus importantes en longueur et en section étaient importées (Sournia et Vayssettes, 1991), et la volonté d'économiser le bois ou de pallier l'absence de grandes pièces a conduit à adopter des solutions techniques qui ont donné une certaine identité à la charpenterie du nord-ouest de la région méditerranéenne, bien qu'elles ne furent pas d'un usage limité à cette seule région. Comme le soulignent Bernardi et Bouticourt (2007), ces techniques peu conformes aux canons des traités édités depuis le XVII^e siècle et le Théâtre de l'art de charpentier de Mathurin Jousse (1978) témoignent d'un milieu professionnel inventif ou tout au moins en recherche de procédés adaptés aux conditions d'approvisionnement particulières auxquelles il se trouvait confronté. Exploitation habile de la complémentarité des parties maçonnées et des parties charpentées, charpentes constituées d'un assemblage d'éléments permettant de fournir des pièces de dimensions plus importantes, telle la poutre armée, et charpentes à fermes diaphragmes sont autant de solutions techniques qui contribuent à donner une certaine identité à la charpenterie de cette région (Bernardi et Bouticourt, 2007) bien qu'elle n'en détienne pas l'exclusivité.

Dans la région méditerranéenne française, les charpentes et les plafonds suscitent des questions relatives aux cultures, aux approvisionnements, aux qualités de bois, aux dimensions disponibles et à leur datation. À l'image de travaux menés dans les îles britanniques, en Belgique, en Allemagne et dans la moitié nord de la France, l'association de l'étude archéologique du bâti et des décors à l'analyse dendrochronologique peut répondre à ces questions. Ce texte apportera un éclairage sur le travail mené depuis quatre ans et détaillera les résultats obtenus sur deux édifices avignonnais.

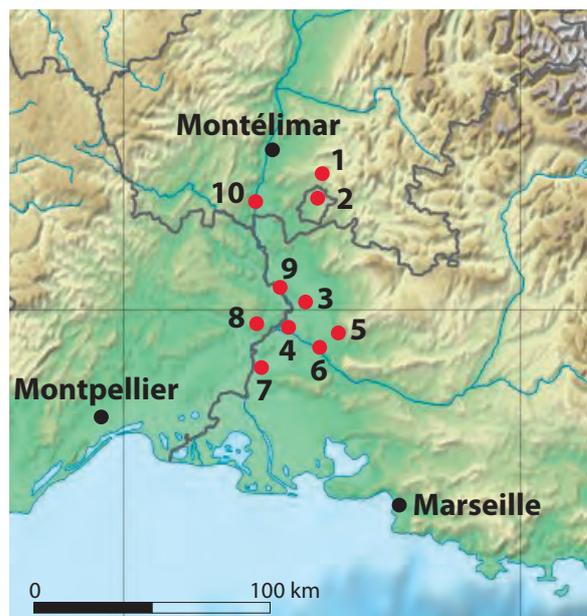
I - MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le territoire de l'étude porte sur la vallée du Rhône méridionale, entre Montélimar et Arles, et ses marges. Les vestiges analysés sont les charpentes de toit, et les plafonds peints de 16 édifices (Figure 1). Afin que les prélèvements soient le plus discret possible, les carottages à cœur des pièces sont effectués à la tarière de Pressler. Occasionnellement, des sections transversales sont recueillies à l'extrémité de pièces qui ne sont pas porteuses. Les prélèvements font l'objet d'une identification anatomique systé-

matique au microscope afin de déterminer l'essence dans laquelle la pièce a été confectionnée. Après mesure de l'épaisseur des cernes à 1/100 mm, les séries d'épaisseurs brutes sont standardisées en indices *E* (Lambert et Lavier, 1992) et les synchronismes inter-sériels sont recherchés à l'aide du test de Student *t* appliqué au coefficient de corrélation inter-sériel et validé par l'examen de la concordance visuelle des courbes correspondantes, et de leur réplique inter-sérielle.



(carte de fond Eric Gaba,
Wikimedia Commons, user Sting)



- Taulignan, maison - 1
 Valréas, hôtel d'Eymeric - 2
 Sorgues, maison de la Reine Jeanne - 3
 Avignon, Petit Palais, livrée de Viviers, hôtel de Rascas,
 chapelle St-Antoine, Petit-Louvre - 4
 Le Thor, château - 5
 Cabannes, château - 6
 Tarascon, château Roi René - 7
 Villeneuve-les-Avignons, chartreuse, palais Arnaud de Via - 8
 Roquemaure, collégiale, maison du Chapitre - 9
 Bourg St-Andéol, maison des Evêques - 10

Figure 1 - Localisation géographique des sites étudiés.

II - RESULTATS ET DISCUSSION

Des poutres armées ont été trouvées et analysées dans les structures de l'hôtel de Rascas, sur la façade du Petit-Louvre et dans les plafonds de la maison du Roi René et du Petit-Palais (Figure 2) à Avignon (Vaucluse), ainsi que dans la chartreuse de Villeneuve-lès-Avignon (Gard). Cette technique fait appel aux charpentes composées et réunit trois

pièces de bois pour constituer une poutre de section plus grande, plus résistante à la charge et qui présente une meilleure résistance à la flexion, ce qui permet de les utiliser pour franchir de grandes portées. L'assemblage est fait adent ou endent car les pièces de bois s'imbriquent entre elles comme des dents.



Figure 2 - Exemple d'une poutre armée du Petit-Palais, Avignon.

Des charpentes à fermes diaphragmes ont été trouvées à l'hôtel d'Eymeric à Valréas (Figure 3) et dans la chapelle Saint-Antoine à Avignon (Vaucluse). Cette technique qui, selon Bernardi et Bouticourt (2007), constitue une originalité régionale, fait usage de petites pièces pour se passer des entrants de grande dimension disposés horizontalement en partie basse des fermes.

Les résultats des identifications anatomiques révèlent l'emploi massif du sapin (*Abies alba* L.) et, à des fréquences beaucoup plus faibles, du mélèze (*Larix decidua* Mill.). En revanche, le chêne (*Quercus* sp.), essence largement identifiée dans les

charpentes à basse altitude en France non méditerranéenne, n'a été identifié que dans la charpente d'une habitation urbaine du village de Taulignan (Drôme).

L'analyse dendrochronologique des pièces de bois (sapin) constitutives d'une série de poutres armées du Petit-Palais à Avignon a permis de les dater vers la fin de la première moitié du XV^e siècle (Figure 4). Cette datation établie sur des référentiels franc-comtois, lorrain et méditerranéen s'accorde avec les dates issues des textes disponibles sur la construction de cet édifice et les mentions de l'utilisation de cette technique dans les sources écrites (Bouticourt, 2008).

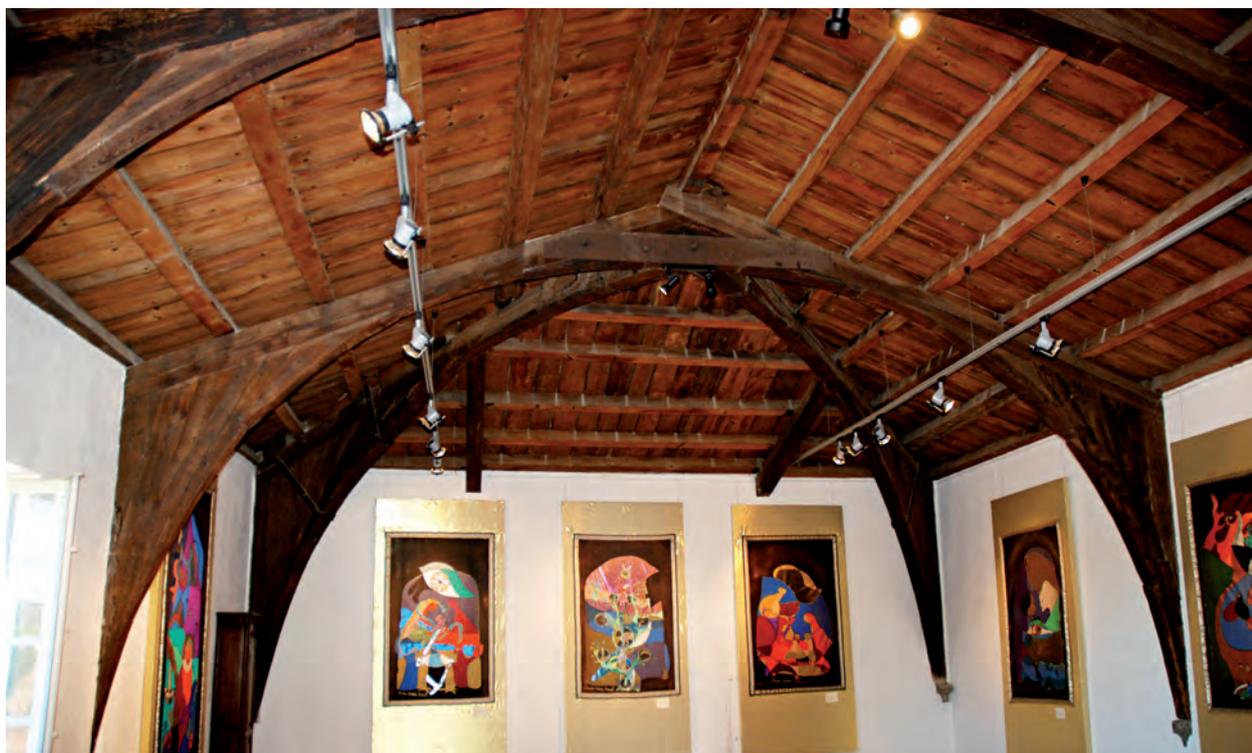


Figure 3 - Exemple d'une ferme diaphragme de l'hôtel d'Eymeric, Valréas.

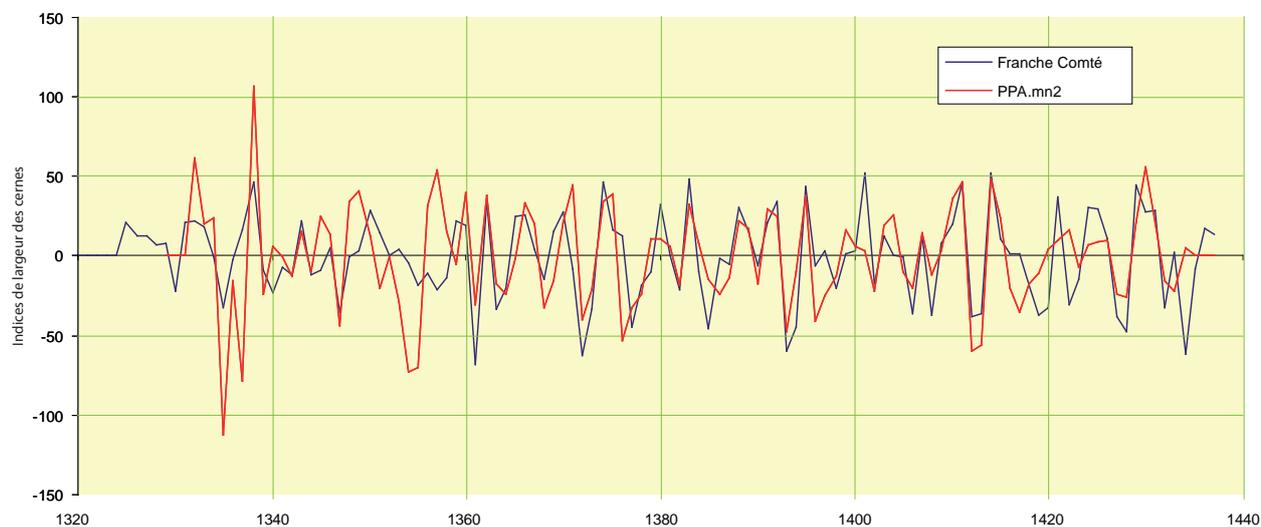


Figure 4 - Synchronisation graphique de la chronologie moyenne du Petit-Palais, Avignon.

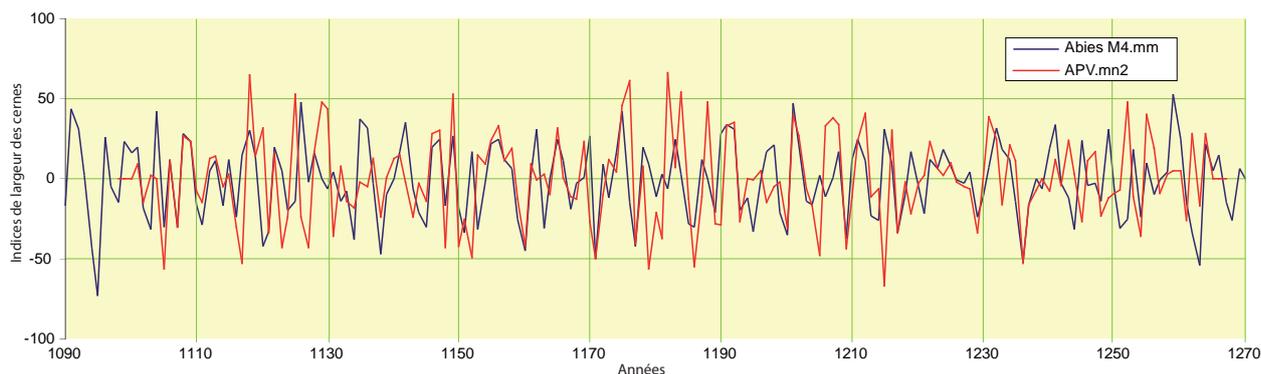


Figure 5 - Synchronisation graphique de la chronologie moyenne du plafond de la livrée de Viviers, Avignon.



Figure 6 - Carte des valeurs t du test de Student entre la chronologie du plafond du Petit-Palais, Avignon, et les référentiels utilisés.

L'analyse dendrochronologique du plafond et de la charpente de la livrée de Viviers à Avignon s'est aussi soldée par un succès : les sapins utilisés pour la confection du plafond ont été abattus dans le dernier quart du XIII^e siècle et ceux employés pour la charpente ont été abattus vers la fin de la première moitié du XV^e siècle (Figure 5).

Dans les deux cas, l'absence du dernier cerne formé avant l'abattage, l'équarrissage des billes et l'impossibilité de distinguer l'aubier du duramen sur le bois de sapin à l'état sec ne nous permettent pas, à ce stade de l'étude de préciser davantage la période d'abattage des arbres. Les faibles différences notées parmi les différents coefficients de corrélation dégagés entre les chronologies représentatives des charpentes méditerranéennes et les référentiels ne se prêtent pas davantage à une interprétation en termes de provenance géographique des sapins utilisés (Figure 6). Les séries datées s'intègrent dans un ensemble de séries de sapin représentatives de charpentes et plafonds de la région méditerranéenne française qui couvre la période 1098-1440 (Figure 7).

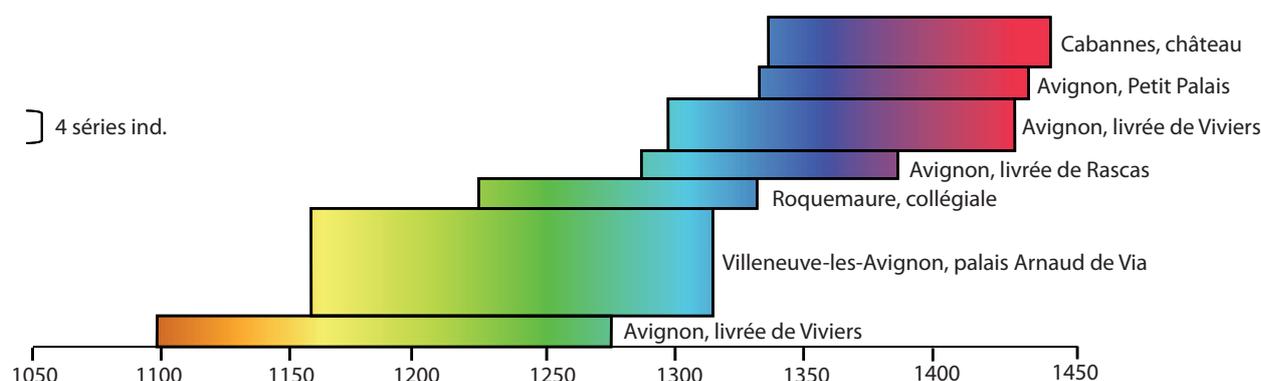


Figure 7 - Bloc-diagramme des chronologies représentatives des plafonds et charpentes datés.

III - CONCLUSION

Au-delà de leurs aspects purement techniques, les charpentes et les plafonds expriment des goûts, des modes et des moyens, et reflètent aussi bien des conditions économiques et culturelles que des contraintes environnementales. A l'image des gisements sous-marins du littoral méditerranéen français (Guibal et Pomey, 2004), les résultats obtenus montrent bien que la richesse du patrimoine que les charpentes et plafonds représentent en région méditerranéenne constitue un terrain d'étude privilégié pour la dendrochronologie qui peut d'une part répondre aux interrogations chronologiques qu'ils posent et d'autre part tirer profit des données

fournies par les pièces de bois des plafonds et des charpentes pour élaborer des référentiels. Associée à l'étude archéologique du bâti, la dendrochronologie permet de décrypter la mise en œuvre des éléments d'architecture et de renseigner sur les techniques mises en œuvre et sur l'histoire des bâtiments. Parallèlement à leur contribution chronométrique, les analyses dendrochronologiques contribuent à des avancées significatives dans l'amélioration des référentiels potentiellement exploitables dans la région méditerranéenne, notamment celui constitué par le sapin sur la période allant du XI^e au XV^e siècle.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNARDI P., BOUTICOURT E., 2007. Les charpentes de toit. *In* Bois et Charpentes, Catalogue d'exposition, Bernardi P. (éd.). Editions du Fournel, L'Argentière-la-Bessée, 190-201.
- BOUTICOURT E., 2008. Les origines médiévales d'une technique de charpente : la poutre armée. *Archéologie du Midi médiéval*, 26, 145-165.
- GUIBAL F., POMEY P., 2004. Dendrochronologie et construction navale antique. *Revue d'Archéométrie*, 28, 35-42.
- JOUSSE M., 1650. Le Théâtre de l'art de charpenterie, enrichi de divers figures, avec l'interprétation d'icelles, fait et dressé par Mathurin Jousse, La Flèche, G. Griveau, 1627. Rééd. Paris, 1650 et Léonce Laget, Paris, 1978.
- LAMBERT G.-N., LAVIER C., 1992. L'étalon de datation dendrochronologique, Bourgogne, 29. *In* Les veines du temps. Lectures de bois en Bourgogne, Catalogue d'exposition, Musée Rolin, Autun, 123-156.
- SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ARCHÉOLOGIE, 1988. Le Pays d'Aix. Actes de la 143^e session du Congrès Archéologique de France (1985). Musée des Monuments Français, Paris, 338 p.
- SOURNIA B., VAYSSETTES J.-L., 1991. Montpellier : la demeure médiévale. Coll. Etudes du Patrimoine, Imprimerie Nationale, Paris, 254 p.

EXPLOITATION À VISÉE ARCHÉO-ENVIRONNEMENTALE DES PATRONS DE CROISSANCE DES BOIS PRÉLEVÉS POUR LA DATATION DU BÂTI LE CAS DES CHÂTAIGNIERS DE LA GRANGE OVALE DE SAINT-ELOY-LES-TUILERIES, CORRÈZE

*USING THE GROWTH PATTERNS OF WOOD COLLECTED FOR THE DATING OF BUILDINGS FOR
ARCHAEO-ENVIRONMENTAL PURPOSES: THE CASE OF THE CHESTNUT TREES
OF SAINT-ELOY-LES-TUILERIES'S OVAL BARN (CORRÈZE, FRANCE)*

CHRISTELLE BELINGARD¹, SANDRINE PARADIS-GRENOUILLET², ROMAIN ROUAUD², PHILLIPE ALLEE²

¹ Dtalents Ingénierie Limoges, chercheur associé Géolab.

² Géolab, UMR 6042, Université de Limoges, 39 E rue Camille Guérin, F 87000 Limoges.

Contact : christelle.belingard@orange.fr

RÉSUMÉ

La charpente de la grange ovale de la ferme de la Rivière, à Saint-Eloy-les-Tuileries en Corrèze, a été datée par dendrochronologie dans le cadre d'une opération de préservation qui s'est déroulée sur les années 2007 et 2008. L'analyse montre que les 21 bois datés sont en châtaignier et proviennent d'arbres abattus durant l'hiver 1569. Ce lot de bois constitue une source d'information unique sur la gestion de la châtaigneraie limousine pour une période très peu documentée par les écrits, et l'exploitation de ces archives-cernes dans une perspective archéo-environnementale est envisagée. En 2008, ce projet est intégré à un PCR piloté par le Géolab, qui comprend déjà un volet sur l'histoire contemporaine de la châtaigneraie limousine (PCR « Géohistoire et géoarchéologie des territoires forestiers limousins »). La croissance des bois de la grange est comparée à celle de châtaigniers actuels représentant les trois types de peuplements existant aujourd'hui en Limousin : le taillis, la futaie et le verger. L'objectif est de définir dans quel type de peuplement arboré ces bois ont été prélevés. Les résultats indiquent que les bois de la grange seraient issus d'arbres de franc-pied, ayant poussé en ambiance forestière et prélevés sur une aire assez étendue. Le potentiel archéo-environnemental des bois anciens échantillonnés pour la datation du bâti est également discuté.

MOTS-CLÉS : DENDROARCHÉOLOGIE, DENDROÉCOLOGIE, CASTANEA SATIVA, HISTOIRE DES FORÊTS, LIMOUSIN.

ABSTRACT

The framework of the oval barn of La Rivière farm, at Saint-Eloy-les-Tuileries in Corrèze, has been dated by dendrochronology in the context of an operation of preservation that took place in 2007 and 2008. The analysis shows that the 21 dated timbers are chestnut wood cut down during the winter of 1569. This set of timbers provides a unique source of information on the management of Limousin chestnut woods for a very poorly documented period, and the interpretation of these tree ring archives in an archaeo-environmental perspective is contemplated. In 2008, this project is integrated into a CRP supervised by Géolab, that already includes a chapter about the recent history of Limousin chestnut woods (CRP "Geohistory and geoarchaeology of Limousin timberlands"). The growth of the barn's beams is compared to that of current chestnut trees representing the three types of stands available today in Limousin: the coppice, the forest and the orchard. The aim is to discover in which kind of wooded lands the beams have been cut. The results indicate that the barn's timbers probably come from own-rooted trees which grew in a forest environment and were felled on a fairly wide area. The archaeo-environmental potential of ancient timbers sampled for the dating of buildings is also discussed.

KEYWORDS: DENDROARCHAEOLOGY, DENDROECOLOGY, CASTANEA SATIVA, FOREST HISTORY, LIMOUSIN.

INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le courant de recherche visant à extraire des archives cernes dispersées dans les bâtiments anciens ou les chantiers de fouilles archéologiques, des informations sur la gestion des forêts du passé (Billamboz, 1996 ; Bourquin-Mignot, 1998 ; Bernard *et al.*, 2003).

En 2007, une datation par dendrochronologie de la charpente de la grange ovale de la ferme de la Rivière à Saint-Eloy-les-Tuileries, dans le nord de la Corrèze, est réalisée par le CEDRE à la demande de la communauté de communes du pays de Saint-Yrieix-la-Perche (Belingard *et al.*, 2007). Cette étude révèle que la charpente date du XVI^e siècle – les arbres ont été abattus durant l'automne-hiver 1569. Ce résultat est très intéressant d'un point de vue archéologique puisque cette charpente constitue, pour la région, une sorte de chaînon manquant entre les centaines de granges ovales recensées à partir de documents d'archives des XVIII^e et XIX^e siècles (2006 granges en 1830) (Guyot, 1978 ; Bans, 1980 ; Platon et Robinne, 1984) et les restes de bâtiments médiévaux de plan bi-absidal ou ovalaire à vocation agricole découverts plus récemment au cours de fouilles archéologiques (Conte et Batt, 2006). Mais cette grange présente une autre particularité extrêmement intéressante d'un point de vue archéo-environnemental cette fois, puisque tous les bois anciens de sa charpente sont en châtaignier.

Le châtaignier aurait été employé très tôt en France comme bois d'oeuvre, mais plutôt pour la fabrication des bardeaux, des planchers ou des chevrons. Car contrairement à l'opinion courante, les grandes charpentes des cathédrales et des châteaux ne sont pas en châtaignier mais en chêne (Pitte, 1986 ; Trénard, 2002 ; Bourgeois, 2004). Dans la région, même les bâtiments plus modestes tels que les églises, les hôtels particuliers ou les maisons fortes livrent peu de bois de charpente de moyenne à forte section en châtaignier ; quand il y en a, ce sont des arbres jeunes avec des séries de cernes courtes qui ne peuvent être datées (Belingard, 2009).

Selon Pitte (1986), si la culture du châtaignier est ancienne en Limousin « rien ne prouve qu'il ait occupé une place prépondérante dans le paysage médiéval de la région ». Et même après la guerre de cent ans, quand la culture de cet arbre connaît une grande expansion dans d'autres régions comme les Cévennes ou la Corse avec les châtaigneraies vivrières, en Limousin, ce que l'auteur nomme la « préchâtaigneraie » médiévale est plus ou moins maintenue. « *Si l'arbre [le châtaignier] est partout, il n'est nulle part envahissant. Il est souvent mentionné en compagnie des autres arbres fruitiers et s'il n'est pas méprisé, il ne sera guère vénéré avant la naissance de la littérature régio-nostalgique du XIX^e siècle* » (Pitte, 1986).

L'utilisation exclusive du châtaignier pour la construction de la charpente de la grange de Saint-Eloy au XVI^e siècle et l'âge des arbres abattus – presque tous centenaires – amène donc un certain nombre de questions quant à la gestion de la châtaigneraie, dans la région, à cette époque. Fin 2008, le projet d'exploiter ces archives cernes dans une perspective archéo-environnementale est intégré à un PCR qui comprend déjà un volet sur l'histoire contemporaine de la châtaigneraie limousine (PCR piloté par le Géolab « Géohistoire et géoarchéologie des territoires forestiers limousins »). En effet, ces chronologies constituent une source d'information unique pour une période plus ancienne et très peu documentée par les écrits – soit les XV^e et XVI^e siècles, période correspondant aux années de croissance des châtaigniers mis en oeuvre dans la charpente.

Concrètement on a cherché à définir dans quel type de formation arborée les bois de la grange avaient été prélevés. Ces bois ont-ils pu être collectés dans un taillis abandonné ? Dans une futaie ? S'agit-il de vieux fruitiers réformés, ou d'arbres d'alignement ?

Pour tenter de répondre à ces questions, la croissance des châtaigniers de Saint-Eloy-les-Tuileries a été comparée à la croissance de peuplements de châtaigniers actuels correspondant aux faciès évoqués ci-dessus.

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Sélection des peuplements témoins actuels

Il est généralement admis que les bois mis en oeuvre dans l'habitat vernaculaire provenaient des alentours du lieu de construction (Lambert, 1998). Par conséquent, la seule contrainte connue à respecter pour la sélection géographique des peuplements témoins, était qu'ils soient le plus près possible à vol d'oiseau de Saint-Eloy-les-Tuileries, afin qu'ils aient grandi dans

la même zone climatique que les bois de la grange et sur la même roche mère granitique.

Les hypothèses correspondant à un couvert dense, soit le « taillis abandonné » et la « futaie », ont été testées à partir de deux peuplements dont l'ambiance est forestière : un taillis âgé de 23 ans et une futaie régulière plantée en 1922 (Figures 1 et 2). Les vergers actuels étant en cours de production, privés et donc impossibles à échantillonner, l'hypothèse « fruitier



Figure 1 - Taillis âgé de 23 ans
(Arnac-Pompadour, Corrèze).



Figure 2 - Futaie régulière âgée de 88 ans
(La Meyze, Haute-Vienne).



Figure 3 - Ancienne allée cavalière du château de Coussac-Bonneval (Haute-Vienne).

réformé / arbre d'alignement » a du être testée à partir d'un peuplement ouvert ressemblant à un verger. Le choix s'est porté sur l'ancienne allée cavalière d'un château, plantée de châtaigniers entre 1885 et 1913 (Figure 3).

Ces trois peuplements témoins – taillis, futaie et allée cavalière – sont situés dans un rayon de moins de 20 km à vol d'oiseau de la grange ovale. Les pré-

lèvements ont été faits à la tarière de Pressler – et à la tronçonneuse pour 6 souches de l'allée cavalière – à raison de 12 arbres par peuplement et de 2 à 3 carottes par arbre. Pour le taillis, les prélèvements ont été réalisés dans les brins dominants en supposant que les brins dominants à 23 ans étaient ceux qui auraient le plus de chances d'avoir survécu cent ans plus tard si le taillis était abandonné. Ils n'ont pas été échantillonnés à hau-

teur de poitrine comme les arbres de la futaie et de l'allée cavalière mais entre 35 et 65 cm de hauteur, en prenant soin d'éviter les zones susceptibles de présenter du bois de tension (Bourgeois, 2004).

2 - Sélection des bois datés de la grange ovale

La charpente de la grange ovale est composée de deux paires de poteaux, chacune portant une ferme, et de deux grands arbalétriers courbes au niveau des absides. Poteaux et arbalétriers courbes sont reliés par un cadre de pannes-sablières sur lequel reposent les chevrons. L'abside nord est aménagée d'un plancher formant une barge pour le stockage des réserves (Figure 4). Vingt huit prélèvements ont été réalisés pour la datation par dendrochronologie, dans la partie basse accessible de la charpente (poteaux, aisseliers, entrants, arbalétriers courbes et sablières) ainsi que dans les poutres et solives du plancher.

Sur ces 28 prélèvements, 21 ont été datés (1569) mais tous n'ont pas été conservés pour l'exploitation archéo-environnementale de leurs séries de cernes. En effet il était nécessaire de pouvoir travailler sur toute la vie de l'arbre y compris sa phase juvénile pour pouvoir effectuer des comparaisons avec la croissance du taillis. Deux prélèvements comportant la moelle

ont été retenus d'office. Pour les 19 autres la distance manquante à la moelle a été estimée à l'aide du logiciel AnthracoloJ, développé au Géolab (Paradis-Grenouillet *et al.*, 2010). Quatre prélèvements, dont l'estimation n'était pas stabilisée et/ou dont l'erreur associée était trop importante, ont été éliminés. Parmi les 15 prélèvements restants, 6 ont été rejetés parce que la distance manquante estimée correspondait potentiellement à plus de 20 ans et qu'ils étaient donc amputés d'une partie de leur phase juvénile – pour estimer le nombre d'années manquantes à la moelle, la distance manquante donnée par le logiciel est divisée par la largeur moyenne des 5 premiers cernes mesurés sur la carotte.

Finalement, 9 bois, dont la série de cernes était complète ou presque, ont été retenus.

3 - Choix des variables pour la comparaison

Deux paires de variables ont été retenues pour caractériser les peuplements actuels et les comparer aux bois des XV^e-XVI^e siècles.

Le coefficient de corrélation calculé sur valeurs indicées (indice Except ; Lambert *et al.*, 1992 ; Guibal *et al.*, 1991) et la concordance graphique du signal de moyenne fréquence des patrons de croissance décri-



Figure 4 - Abside nord de la grange ovale de la ferme de la Rivière (Saint-Eloy-les-Tuileries, Corrèze).

vent la ressemblance entre les chronologies, à l'échelle temps de l'année et de la décennie ; ce sont potentiellement des indicateurs de la dispersion spatiale des bois collectés.

Le cerne moyen et le rayon à âge cambial égal décrivent le dynamisme de la croissance radiale de façon globale et tout au long de la vie de l'arbre ; dans une même zone bioclimatique, ce sont potentiellement des indicateurs de la densité relative des peuplements.

Les ajustements suivants ont été nécessaires. Deux séries de calculs ont été réalisées pour le cerne moyen : une première sur les chronologies complètes puis une seconde sur les 25 premières années afin de pouvoir inclure le taillis dans la comparaison. En outre, le coefficient de corrélation moyen d'un peuplement témoin actuel de type dispersé a été créé en effectuant

les calculs de corrélation entre les arbres de l'allée cavalière et ceux de la futaie (corrélations inter-sites). Concernant le signal de moyenne fréquence, seuls les patrons de croissance des arbres âgés (futaie, allée, grange) ont été examinés, ceux du taillis étant bien sûr trop courts. Enfin, dans un souci de cohérence et pour ne pas biaiser les comparaisons, 2 arbres de la futaie et 1 de l'allée cavalière, qui étaient mal corrélés avec leurs congénères (corrélations intra-sites), ont été retirés de l'analyse. En effet si l'interdatation avait été réalisée en aveugle pour les peuplements actuels comme c'est le cas pour les bois anciens, ces arbres auraient été jugés non contemporains des autres individus du même groupe et auraient été traités à part pour la recherche de date.

II - RÉSULTATS ET DISCUSSION

1 - Comparaison des coefficients de corrélations moyens des différents groupes et comparaison des patrons de croissance

Les comparaisons des coefficients de corrélation (R) et des *t* de Student moyens des matrices de corrélation intra ou inter-site (Figure 5) montrent que les valeurs actuelles les plus proches de celles des bois de la grange sont celles du peuplement dispersé (inter-site futaie-allée cavalière).

| Synchronismes intra et inter-sites | | |
|------------------------------------|--------------------|------------------|
| | R (σ) | t (σ) |
| Allée | 0,40 (0,16) | 4,3 (2) |
| Futaie | 0,58 (0,07) | 6,3 (1,1) |
| Inter futaie/allée | 0,37 (0,09) | 3,4 (1) |
| Grange | 0,34 (0,13) | 3,3 (1,4) |

Figure 5 - Résultats des recherches de synchronisme intra et inter-sites. Coefficient de corrélation (R) et *t* de Student. Valeurs moyennes et écart-types.

La comparaison graphique du signal de moyenne fréquence des patrons de croissance au sein des différents groupes suggère aussi que les arbres de la grange n'étaient pas de proches voisins. En effet, dans le cas d'arbres issus de la même parcelle comme l'allée cavalière et plus encore la futaie, des variations synchrones de moyenne fréquence se retrouvent d'un arbre à l'autre (Figure 6). La plupart de ces variations ne se produisent pas au même moment dans l'allée et dans la futaie, ce qui exclut l'hypothèse de variations liées aux fluctuations climatiques et confirme celle de variations liées à des perturbations stationnelles (interventions sylvicoles). Dans le cas des bois de la grange, les variations de moyenne fréquence sont complètement

asynchrones ; de plus les bois sont issus de 3 générations différentes (Figure 6). Bien que ces observations ne constituent pas des preuves - car on peut toujours imaginer des interventions très localisées et décalées dans le temps à l'intérieur d'une même parcelle - elles plaident en faveur d'une collecte de ces bois sur plusieurs parcelles.

2 - Comparaison du dynamisme de la croissance des différents groupes

La comparaison des cernes moyens et des courbes de croissance cumulée à âge cambial égal (Figures 7 et 8) montre, sans surprise, que, sur la période actuelle, la croissance radiale est globalement plus rapide pour les arbres d'alignement (l'allée cavalière) que pour ceux vivant dans un peuplement forestier, plus dense (la futaie). Les résultats obtenus suggèrent également que les conditions de croissance des arbres de la grange étaient encore plus contraignantes que celles des arbres de la futaie actuelle (Figure 7). Un plus grand stress lié à la compétition intra et interspécifique pourrait expliquer cette différence et il est possible que les arbres de la grange aient grandi dans une forêt plus dense que la futaie actuelle.

Toutefois, il semblerait que les arbres actuels bénéficient d'une amélioration récente des conditions de croissance. En effet, des travaux menés par les forestiers font état d'une augmentation de la productivité des forêts depuis le début du XX^e siècle (Dhôte *et al.*, 2000a, 2000b), augmentation qui serait à mettre en relation avec les changements climatiques et /ou l'augmentation du taux de CO² atmosphérique.

En outre, les auteurs ayant travaillé sur les profils de tige du chêne sessile (Dhôte *et al.*, 1997) et du hêtre

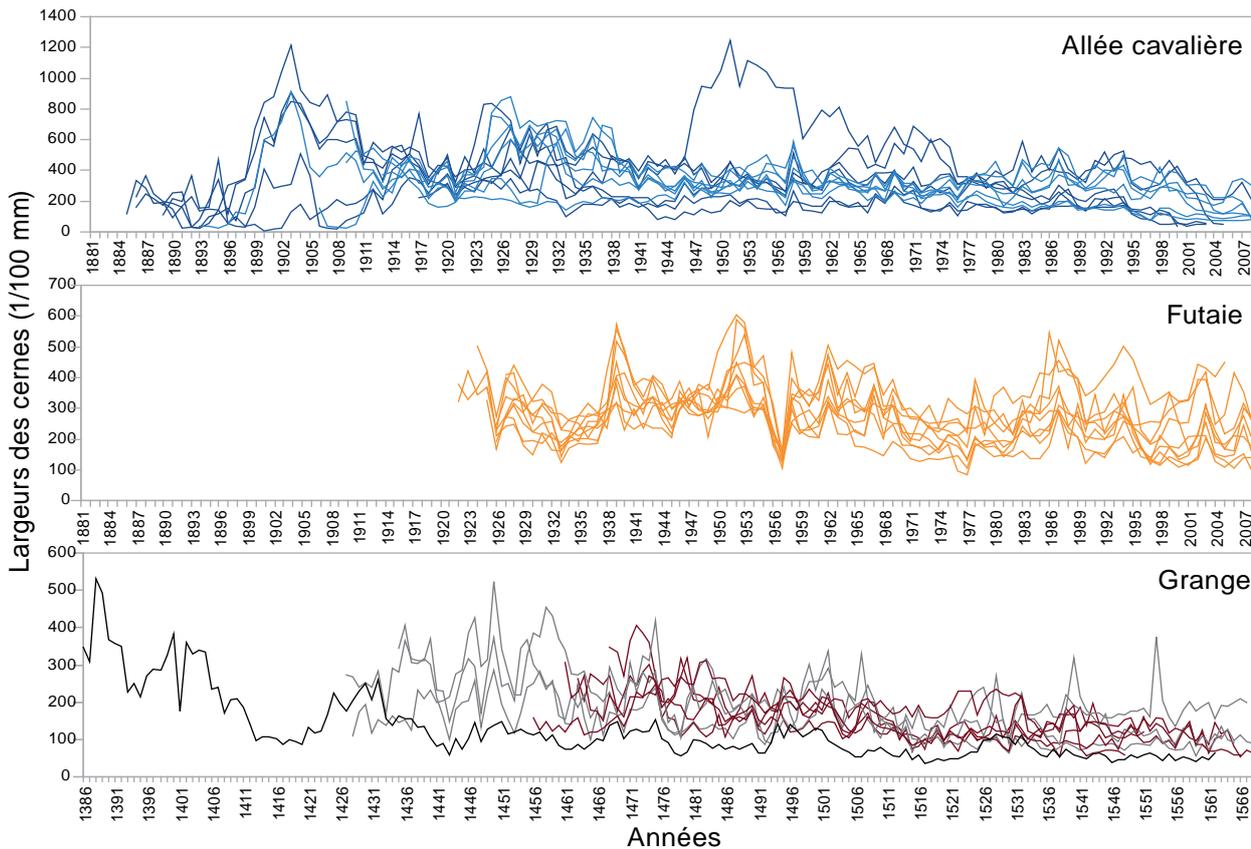


Figure 6 - Concordance des variations de moyenne fréquence au sein des différents groupes. Une courbe représente le patron de croissance d'un arbre ou d'un bois.

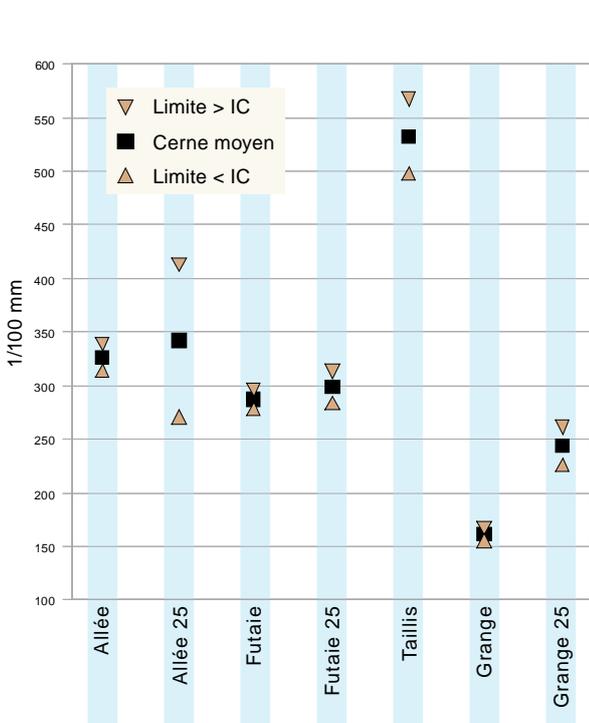


Figure 7 - Comparaison des cernes moyens. Chronologies complètes et jusqu'à 25 ans d'âge cambial. Limites < > : limites inférieures et supérieures des intervalles de confiance des moyennes. Risque d'erreur de 1%.

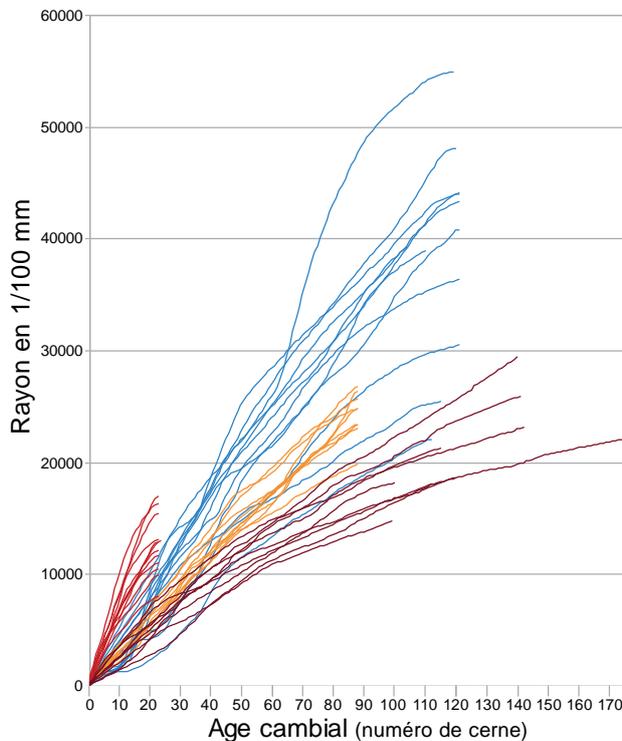


Figure 8 - Rayons à âge cambial égal pour le taillis (en rouge), l'allée cavalière (en bleu), la futaie (en orange) et la grange (en brun). Une courbe représente un arbre ou un bois.

(Bouriaud *et al.*, 2005) constatent que la croissance radiale varie le long du tronc en fonction de plusieurs facteurs parmi lesquels le climat et l'âge de l'arbre. Chez le chêne sessile le cerne moyen est systématiquement plus large dans la zone d'empatement, à la base du tronc. A hauteur de poitrine (1m30), il est surestimé de 4% par rapport au reste de la bille et la surestimation atteint 22% si les prélèvements sont effectués à 45 cm au dessus du sol. L'intensité et la portée de la zone d'empatement évoluent avec le temps ; cette zone est relativement réduite quand l'arbre est jeune mais elle atteint couramment 3 m de hauteur chez un chêne mature (Dhôte *et al.*, 1997). Cette réalité est forcément source d'erreur lorsqu'on compare la croissance de chênes historiques à celles d'arbres actuels – généralement échantillonnés à la tarière de Pressler à hauteur de poitrine. Car, le prélèvement des échantillons destinés à la datation d'un bâtiment se fait de préférence là où il reste du cambium ou au moins des cernes d'aubier puisque c'est la date d'abattage des arbres que l'on recherche. Dans le cas des bois équarris, du fait de la conicité du tronc, on est amené à prélever très souvent en haut de la bille. Sans aller jusqu'à transposer les valeurs, si la croissance radiale varie le long du tronc des hêtres et des chênes, il n'y a, *a priori*, aucune raison pour que cela ne se produise pas chez le châtaignier. Alors, l'effet « empatement » pourrait être responsable d'une surestimation de la valeur du cerne moyen des arbres actuels matures de l'allée cavalière et de la futaie.

Finalement, une partie de la différence entre les cernes moyens des arbres de la grange et de la futaie actuelle pourrait s'expliquer par les meilleures condi-

tions climatiques du XX^e siècle auxquelles s'ajouterait la surestimation liée à « l'effet empatement ». Dans ces conditions, la part attribuable au stress de compétition est moindre et la forêt d'origine des bois de la grange n'était peut-être pas plus dense que la futaie du XX^e.

La vitesse de croissance des brins du taillis se révèle, quant à elle, très supérieure à celle de tous les autres arbres actuels et anciens, au même âge cambial (Figures 7 et 8). Après une coupe de régénération, les rejets du châtaignier ont une croissance extrêmement dynamique du fait des réserves glucidiques accumulées dans le système racinaire de la souche (Bourgeois, 2004). Les arbres de la grange ne semblent pas avoir bénéficié en début de vie des réserves d'un système racinaire déjà développé. Leur vitesse de croissance est du même ordre de grandeur que celle des arbres plantés de la futaie ou de l'allée cavalière.

Cependant, là encore, la hauteur de l'échantillonnage sur les bois anciens peut être source d'erreur. Le décalage entre l'âge de l'arbre et l'âge cambial à 5 m du sol (haut de bille) serait, pour des châtaigniers de franc-pied, d'environ 10 ans (Bourgeois, 2004 ; site web du CRPF de Lozère). Du fait de la tendance d'âge (Schweingruber, 1988) le cerne moyen des bois de la grange serait alors sous-estimé – parce que décalé de 10 ans –, surtout quand il comprend peu de valeurs comme dans la comparaison jusqu'à 25 ans d'âge cambial. Cependant la différence entre la grange et le taillis est telle (Figure 7), qu'il est très peu probable que la sous-estimation éventuelle du cerne moyen de la grange suffise à l'expliquer. L'origine de la tige – semis *versus* rejet de souche – en est donc bien la cause.

CONCLUSION

Malgré l'erreur inhérente à la hauteur variable des échantillonnages, il semblerait que l'on puisse quand même conclure que les bois mis en oeuvre dans la charpente de la grange ovale de Saint-Eloy-les-Tuileries proviennent d'arbres de franc-pied ayant poussé en ambiance forestière et que l'aire de prélèvement ait été relativement étendue. Ce portrait permet de rejeter l'hypothèse selon laquelle les bois auraient pu être collectés dans un taillis abandonné depuis des dizaines d'années. Il ne s'agirait pas non plus d'arbres de jardin, verger ou alignements. En revanche, les trois critères énoncés ci-dessus seraient réunis si ces bois provenaient d'arbres de réserves de taillis sous futaie. Le patron de croissance de l'arbre le plus âgé (en noir sur la Figure 6) montre des accélérations de croissance dont la périodicité (autour de 25 ans) soutiendrait cette hypothèse. En effet, une coupe de régénération tous les 20-30 ans

correspondrait à la gestion d'un taillis « classique » (Bourgeois, 2004) (il n'y a malheureusement pas de signature aussi claire dans les autres patrons de croissance). Les arbres de la grange seraient alors issus de semis apparus à la faveur de coupes du taillis puisque le châtaignier est décrit comme un héliophile tolérant dont les semis peuvent supporter la demi ombre d'une coupe de régénération mais pas un couvert complet (Bourgeois, 2004).

Enfin, pour toutes les analyses dendrochronologiques (datation) de routine, la possible exploitation *a posteriori*, dans une perspective archéo-environnementale, des séries de cernes datées devrait être prise en compte dès le travail de terrain. Une attention particulière pourrait être accordée à la présence de la moelle sur l'échantillon et au repérage de la hauteur du prélèvement dans la bille pour les bois longs.

Remerciements

Un remerciement particulier est adressé à Messieurs Perrault et Girardclos du Cedre pour m'avoir autorisée à réutiliser les chronologies et les échantillons de la grange de Saint-Eloy, à Monsieur Rideau du CRPF Limousin pour son aide lors de la prospection des peuplements actuels, à Messieurs Lacotte, Béchade et de Bonneval, les propriétaires des arbres échantillonnés et Monsieur Grenouillet pour sa participation efficace et bénévole aux prélèvements.

BIBLIOGRAPHIE

- BANS J.C., 1980. Notes sur les granges-étables ovalaires du Limousin. *Lemouzi*, 76, 417-439.
- BELINGARD C., GIRARDCLOS O., PERRAULT C., 2007. Datation par dendrochronologie de la grange ovale de la ferme de La Rivière à Saint-Eloy-les-Tuileries (19). Rapport d'étude CEDRE, 23 p.
- BELINGARD C., 2009. Analyse par dendrochronologie des bois anciens de l'Hôtel des Clédats - Porte Bécharie, à Uzerche (19). Rapport d'étude Dtalents Ingénierie, 27 p.
- BERNARD V., RENAUDIN S., MARGUERIE D., 2003. Evidence of trimmed oaks (*Quercus* sp.) in north western France during the early middle ages (9th - 11th centuries A.D.). *Meas. Sci. Technol.*, 14, 1510-1515
- BILLAMBOZ A., 1996. Tree rings and pile-dwellings in southwestern Germany : following in the footsteps of Bruno Huber. In « Tree Rings, Environment and Humanity », J.S. DEAN, D. MEKO, T. SWETNAM ed.. *Radiocarbon*, 471-483.
- BOURIAUD O., BRÉDA N., DUPOUEY J.-L., GRANIER A., 2005. Is ring width a reliable proxy for stem biomass increment ? A case study in European beech. *Can. J. For. Res.*, 35, 2920-2933.
- BOURGOIS C., 2004. Le châtaignier : un arbre, un bois. Institut pour le Développement Forestier, 2^e éd. 347 p.
- BOURQUIN-MIGNOT C., 1998. La chronologie des bâtiments II et III du site de Colletière. In L'habitat fortifié littoral de Colletière à Charavines (Lac de Paladru, Isère) dans son environnement. Rapport de synthèse triennal 1996-1998. Dir. Collardelle M. et Verdral E, 254-259.
- CONTE P., BATT M., 2006. « Maison-mixte » et bâtiments à plan absidal en Bretagne et dans le Limousin du XI^e au XVI^e siècle. In Cadre de vie et manières d'habiter (XII^e - XVI^e siècle), Publications du CRAHM, 21-38.
- DHÔTE J.F., HATSCH E., RITTIÉ D., 1997. Profil de la tige et géométrie de l'aubier chez le chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.). *ONF, Bulletin Technique*, 33, 59-81.
- DHÔTE J.-F., HERVÉ J.-C., 2000 a. Changement de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. *Ann. For. Sci.*, 57, 651-680.
- DHÔTE J.-F., DUPOUEY J.-L., BERGÈS L., 2000 b. Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises. *Rev. For. Fr.*, LII, numéro spécial, 37-48.
- GUIBAL F., LAMBERT G.-N., LAVIER C., 1991. Application de trois tests de synchronisation à trois types de données. *Dendrochronologia*, 9, 193-206.
- GUYOT F., 1978. Les « granges-chapiteaux » du Limousin ou « escuras-bossas ». *Ethnologia*, 6-7, 71-85.
- LAMBERT G.-N., LAVIER C., GUIBAL F., 1992. La dendrochronologie, une méthode précise de datation. *Mémoires de la Société Géologique de France*, 160, 109-117.
- LAMBERT G.-N., 1998. La dendrochronologie, mémoire de l'arbre. In La datation en laboratoire. Collection « Archéologiques » dirigée par A. Ferdière. Ed. Errance, 13-69.
- PARADIS-GRENOUILLET S., LELEU J.-P., BELINGARD C., ROUAUD R., ALLÉE P., 2010. AnthracoloJ, un outil pour l'automatisation des mesures dendrométriques en anthracologie. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009. *Collection EDYTEM*, 11, 199-204
- PLATON C., ROBINNE P.-E., 1984. Les granges ovales en Limousin. Ed. CNRS. *Revue de l'art*, 65, 59-64.
- PITTE J.-R., 1986. Terres de castanide. Hommes et paysages du châtaignier de l'Antiquité à nos jours. Fayard, 479 p.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1988. Tree rings - Basics and applications of dendrochronology. D. Reidel Publishing Company (Kluwver Academic Publishers Group), 276 p.
- TRÉNARD Y., 2002. Les bases de la dendrochronologie. In Les charpentes du XI^e au XIX^e siècle. Typologie et évolution en France du Nord et en Belgique. Collectif sous la direction scientifique de P. Hoffsummer. Centre des monuments nationaux / Monum, Editions du Patrimoine, Paris, 75-83.

ARBRES NON FORESTIERS ET DENDROLOGIE

APPORTS DE L'ÉTUDE DE JEUNES BRANCHAGES ARCHÉOLOGIQUES DU NORD DE LA FRANCE

NONFOREST TREES AND DENDROLOGY

CONTRIBUTIONS OF THE STUDY OF YOUNG ARCHAEOLOGICAL BRANCHES IN THE NORTH OF FRANCE

ANNE DIETRICH¹, BLANDINE LECOMTE-SCHMITT²

¹ CNRS UMR 7041, Inrap Centre Ile-de-France, 32 rue Delizy, F 93694 Pantin cedex.

² Inrap Centre Ile-de-France, 34-36 avenue P-Vaillant-Couturier, F 93120 La Courneuve.

Contact : anne.dietrich@inrap.fr

RÉSUMÉ

L'étude xylologique des branchages fournit un bon reflet de l'exploitation du paysage arboré. Le classement du corpus taxonomique et les motifs de croissance nous renseignent sur leur milieu d'origine. Les résultats montrent la présence et l'exploitation intense de milieux arborés non forestiers. En dehors des massifs fournisseurs de bois de construction ou de combustible, les arbres de milieux plus ouverts sont utilisés de façon domestique ou artisanale. Collecte sauvage, entretien, culture, plantation peuvent alors être mis en relation avec les biotopes de lisière, haie, verger, etc. Les données morphologiques couplées aux observations dendrologiques complètent alors les résultats dendrochronologiques et mettent en parallèle forêts et arbres plus isolés.

MOTS-CLÉS : XYLOGIE, DENDROLOGIE, BRANCHAGES, BOIS GORGÉS D'EAU, CLASSES D'ÂGE, SAISON DE COUPE, ARBRE, GALLO-ROMAIN, HAUT-MOYEN-ÂGE.

ABSTRACT

The xylological study of the branches brings a lot of data about trees from which they come. Often forsaken by dendrochronology because not mature enough, they provide a good image of the raised landscape. It makes vegetal associations more specifically precise. The classification of the taxonomic corpus and the growth pattern give information about their living location. The results show the presence of an intense exploitation of non forest trees. Apart from the forest trees, suppliers of firewood or structural timbers, the trees coming from openfields or cattlefields are principally used in a domestic or artisanal way. Wild collect, maintenance, culture, plantation can be put into relation with the biotopes of edge, hedge, orchard, etc. Morphological data and observation of the growths complete the dendrochronological results authorizing a parallel between forests and isolated trees.

KEYWORDS: XYLOLOGY, DENDROLOGY, ARCHAEOLOGICAL BRANCHES, WATERLOGGED WOOD, AGE CLASSES, SEASONALITY, TREE, GALLO-ROMAN, HIGH-MIDDLE-AGE.

INTRODUCTION

Les cernes des arbres sont de bons enregistreurs d'un grand nombre de phénomènes naturels. Les variations climatiques, catastrophes naturelles et autres incidents de croissance liés à l'homme ne sont cependant perceptibles que sur des sections d'arbres disposant d'un nombre suffisant de cernes annuels de croissance.

Les petits branchages, malgré leur jeune âge ne sont pas dénués d'intérêt et nous présentons ici les résultats obtenus par des xylologues d'après l'observation des cernes des branchages.

Les vingt-cinq sites ayant servi de base de réflexion à cet article se trouvent tous au nord de la Loire. Les études de branchages ont été réalisées au cours des 20 dernières années par Anne Dietrich (AD) et Blandine Lecomte-Schmitt (BLS) au gré des découvertes en archéologie préventive. Seize sites sont effectivement présentés dans cet articles (Figure 1).

Cette présentation ne traite plus d'études de cas superposées mais de résultats globaux sur une accumulation de données maintenant assez conséquente pour former des corpus et les bases de la réflexion sur les représentations taxonomiques obtenus à partir des branchages.

Les corpus taxonomiques systématiques se complètent ici par les données dendrologiques comme la saison de coupe ou de chute, l'âge et les diamètre des tiges font l'objet d'une analyse nouvelle. Ces données nous renseignent sur la saisonnalité des activités anthropiques et le choix qualitatif des matériaux.

Dans cette optique nous avons sélectionné un certain nombre d'exemples dont le déséquilibre entre protohistoire et Antiquité suit les progrès de l'archéologie préventive. Les grandes tendances plus fiables pour l'Antiquité et le Moyen-âge sont nettement mieux documentées et peuvent être commentées.

| Site / Département | Rapports xylologiques ou rapports de fouille | Auteur de l'étude xylologique | Contexte | Datation | Nb total de fragments | Nb de taxons | Saisonnalité observée (coupe ou chute naturelle) |
|--|--|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------|--|
| Tourville-la-Rivière (76) | Dietrich 2004 | AD 2004 | Paléochenal | IV ^e s. av. J.-C. | 59 | 8 | Hiver |
| Varenes, Marais du Colombier (77) | Séguier 2007 | BLS 2008 | Puits | IV-III ^e s. av. J.-C. | 214 | 12 | |
| Servon (77) | Gentili-Dietrich 1993 | AD 1993 | Puits | I-II ^e s. ap. J.-C. | 1339 | 12 | |
| Rouen, Place de la Pucelle (76) | Langlois, Billard 1997 | AD 1997 | Fosses | I ^{er} s. ap. J.-C. | 257 | 12 | |
| Montévrain, ZAC Clos Rose (77) | Berga à paraître | BLS 2008 | Paléochenal et puisard | I ^{er} s. ap. J.-C. | 596 (142+454) | 14 | Hiver (paléochenal) Été (puisard) |
| Mazières-en-Mauge (78) | Berthaud 2000 | AD 2000 | Puits | II ^e s. ap. J.-C. | 200 | 9 | Hiver Été |
| Meaux, Rocade Sud-Ouest (77) | Bet 2008 | BLS 2008 | Puits | Bas Empire | 242 | 15 | |
| Jossigny (77) | Guy, Desrayaud, Dietrich 2005 | AD 2005 | Puits | II-III ^e s. ap. J.-C. | 65 | 3 | |
| Magny-le-Hongre, ZAC Courtalin (77) | Desrayaud 2004 | AD 2004 | Installations hydrauliques | III ^e s. ap. J.-C. | 363 | 6 | |
| Lieusaint, ZAC Pyramide lot E2D4 (77) | Mondoloni A paraître, BLS 2009 | BLS 2009 | Mare et puits | I-IV ^e s. ap. J.-C. | 574 (266+308) | 14 | Été (mare) Hiver (puits) |
| Jouars-Pontchartrain (78) | Blin 1999 AD 1996 | AD 1996 | Puits | I-IV ^e s. ap. J.-C. | 942 | 15 | |
| Brissay-Choigny, Les Courts Marchés (02) | Oudry à paraître | AD 2008 | Paléochenal | IV-VII ^e s. | 33 | 5 | |
| Paris, Musée du Quai Branly (75) | Lecomte-Schmitt 2004 | BLS 2004 | Paléochenal | V-VII ^e s. | 68 | 11 | |
| Neuvy-deux-Clochers, Tour de Vesvre (18) | Mataouchek 2009 | BLS 2006 | Plate-forme de fondation | X ^e s. | 639 | 24 | Hiver |
| Etampes, rue du Rempart (91) | Peixoto à paraître BSL 2007 | BLS 2007 | Latrines | XIV-XVII ^e s. | 1045 | 21 | |
| Tigery, ZAC de la Pépinière (77) | Renel 1 al 2009 | BLS 2005 | Mare | XI au XIX ^e s. | 372 | 20 | |

Figure 1 - Détail par site des quantités et types de vestiges ligneux ayant servi à l'élaboration de cet article.

I - LE MATÉRIAU D'ÉTUDE

1 - Nature et conditions de découverte

Les bois gorgés d'eau sont en général découverts dans les couches profondes de structures archéologiques rapidement colmatées et restées en eau depuis leur enfouissement. Les grosses pièces de bois provenant de structures en place (cadres de puits, fondations de quais, éléments de batellerie) ou démantelées (pièces d'architecture et d'ameublement) constituent encore trop souvent les seuls éléments ramassés, restaurés et publiés.

Dans les remplissages les plus profonds des structures creuses, les petits branchages sont extrêmement fréquents. Ils proviennent des jeunes pousses, du chevelu du houppier d'arbres matures, ou de taillis. Deux types de structures sont concernées : les structures anthropiques, au premier rang desquelles les puits et latrines, et les structures naturelles (mares, chenaux). La nature de la couche n'est alors pas la même. Les puits, après une période d'utilisation plus ou moins longue, servent de dépotoir lorsqu'ils ne sont plus en usage. Ils peuvent accueillir en un seul geste de rejet un lot entier d'éléments mis au rebut. Les latrines sont de véritables poubelles urbaines dans lesquelles sont jetés toutes sortes de déchets y compris des restes de branchages. Dans ces structures anthropiques, le rejet est le résultat d'un geste volontaire. A l'inverse, les chenaux et les mares accueillent le plus souvent la chute naturelle de branches provenant soit des arbres de berges, soit d'arbres un peu plus éloignés, les branches pouvant alors être transportées sur de plus ou moins longues distances par le courant d'un cours d'eau. Un geste volontaire de rejet n'est bien sûr pas impossible.

Il découle de ce préalable que la nature même des vestiges découverts ne peut être identique, ni de fait raconter la même histoire : véritable reflet d'un environnement dans un cas, elle subit le biais de la sélection par l'homme dans l'autre. Ces paramètres sont bien évidemment à considérer lors de l'étude d'une collection.

2 - Branches et branchages

L'obtention d'une liste taxonomique est la première étape de l'analyse xylologique des branchages archéologiques. Ces résultats découvrent certains aspects

des paysages passés et prospectés par l'homme. Les termes de branches et branchages désignent des bois de section anatomiquement complète et ne dépassant pas quelques centimètres de diamètre. Ils comportent une surface naturelle mais leurs extrémités peuvent être fort différentes. Parmi ces brins, bois naturels et bois travaillés sont généralement considérés comme un tout indissociable. Difficile à différencier, seuls les éléments porteurs de traces de coupe ou de façonnage se classent sans problème en bois travaillés. Et, sans la trace laissée par l'outil à la récolte (biseau de coupe du couteau ou de la serpe), il devient très difficile de séparer les éléments résultant d'une volonté de ramassage de ceux tombés et accumulés sous l'effet de processus naturels (bourrasques de vent, pluie, poids de la neige, ...). Le « bois mort » semble rare puisque les traces d'une chute naturelle de l'écorce ou les traces vermiculaires de diverses larves et autres xylophages à la surface sont rarement représentées. Le corpus prend donc en compte tous les brins ronds, quelque soit la nature des extrémités (taillées ou non). Les objets, déchets de taille et bois débités dans leur section ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Malgré la richesse taxonomique apparente des branchages, il est difficile d'obtenir un aperçu environnemental précis. Le plus souvent, les éléments de bois sont concentrés en une couche ou deux au fond des structures en eau.

La dendrologie appliquée aux branchages s'attache principalement à l'observation des classes d'âge et des saisons de coupe. Ces deux approches méthodologiques nous aident à compléter notre vision du paysage ancien. Les brindilles étant jeunes, elles offrent une croissance logiquement rapide. Les caractéristiques et anomalies recueillies, couplées à la morphologie des tiges (rectitude, traces de compression, de ligature) nous en disent beaucoup sur les traitements subis par les arbres. L'utilisation des branchages récoltés participe de la sphère agricole ou artisanale : tiges destinées à être tressées en clayonnages ou en paniers, ou fendues pour en faire des cerclages comme sur le site de Lieusaint (Lecomte-Schmitt, 2009c), très jeunes branchages à vocation de litière ou de fourrage d'appoint comme à Varennes-sur-Seine (Lecomte-Schmitt, 2006), tiges liées à la cueillette des fruits et baies comme à Etampes (Lecomte-Schmitt, 2007a) ou à Mazière (Dietrich, 2000).

II - TAXONOMIE ET DENDROLOGIE DES BRANCHAGES

Les seize sites retenus pour cet article représentent un total de plus de 7000 fragments de branchages étudiés.

1 - Une grande variété d'approvisionnement : une constante au cours des siècles

Les exemples sélectionnés ci-dessous par ordre chronologique tendent à illustrer la grande variété des

choix et ressources offerts et exploités par l'homme.

a - La Tène

Sur le site de Varennes-sur-Seine « Le Marais du Colombier », divers éléments ont été découverts dans les couches basales du puits 5003, daté de la fin IV^e - début III^e s. av. J.-C. Ces jeunes branchages présentent une belle variété taxonomique comprenant liane (clématite), arbustes (vigne, fusain, charme, noisetier) et plantes plus inhabituelles pour la xylogologie (plantain). Tous ne proviennent pas d'un même milieu. L'extrême petitesse des diamètres (entre 0,2 et 0,4 cm) couplée à l'aspect carbonisé ou semi carbonisé d'une partie du corpus nous a amenés à les interpréter comme de la litière ou du fourrage incendié (Figure 2).

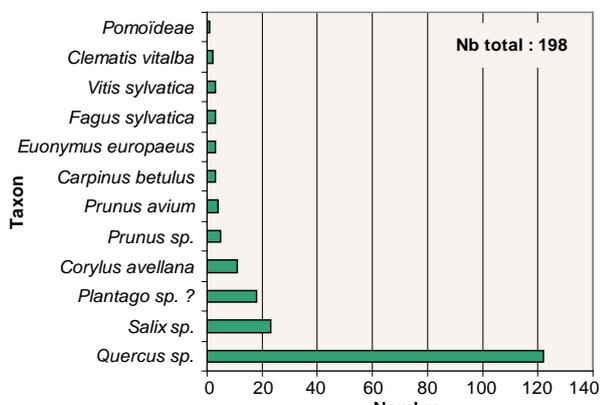


Figure 2 - Représentation taxonomique des branchages du site de Varennes-sur-Seine « Le Marais du Colombier ».

b - La période gallo-romaine

Il s'agit de la période la plus abondante en données. Cela reflète les choix lors des prescriptions archéologiques. En structure ouverte comme en structure profonde, la diversité est visible et montre l'abondance de la ressource bois quelque soit le milieu considéré. Ainsi à Montévrain, le ru des Gassets révèle ses rives ombragées d'aulnes, de saules, de frênes et d'ormes. A l'opposé, on trouve à Lieusaint une mare dont les berges sont presque exclusivement occupées par des ormes accompagnés de saules, et qui ne semblent pas exploités (Lecomte-Schmitt, 2008). Alors que dans le puits du même site, les vestiges d'un artisanat de la vannerie et du cerclage indiquent l'exploitation d'une végétation autre : noisetiers pouvant provenir de corylaies (nous sommes en contexte artisanal), saules le long du ru des Heauldres ou de la mare toute proche. Les datations de ces vestiges sont encore en cours d'étude, les branchages trouvés dans le puits pourraient être mérovingiens.

À Servon, noisetier et aulne sont très largement en tête de corpus, accompagnés du sorbier (Dietrich,

1993). Les autres essences font état d'un milieu plutôt frais accompagnant l'aulne (sureau, charme, frêne, peuplier ; Figure 3).

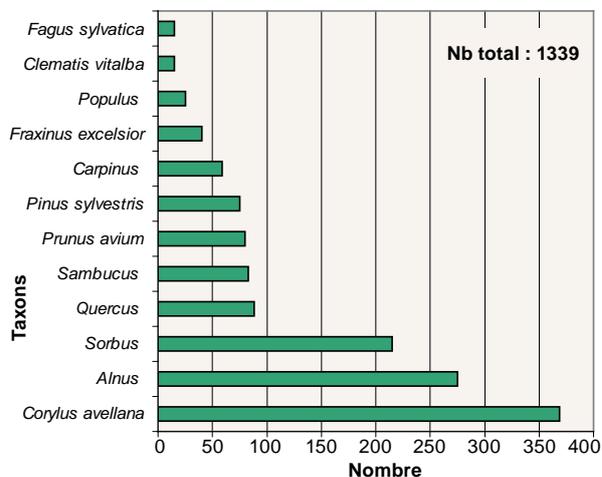


Figure 3 - Représentation taxonomique des branchages du site de Servon « L'Arpent-Ferret ».

Une image assez proche se dégage du site de Rouen (Dietrich, 1997) où le noisetier domine là encore l'assemblage taxonomique, toutefois talonné par des essences plus forestières (chêne et hêtre). Une ripisylve est sans doute également à envisager (aulne, orme, nerprun, vigne, frêne, sureau ; Figure 4)

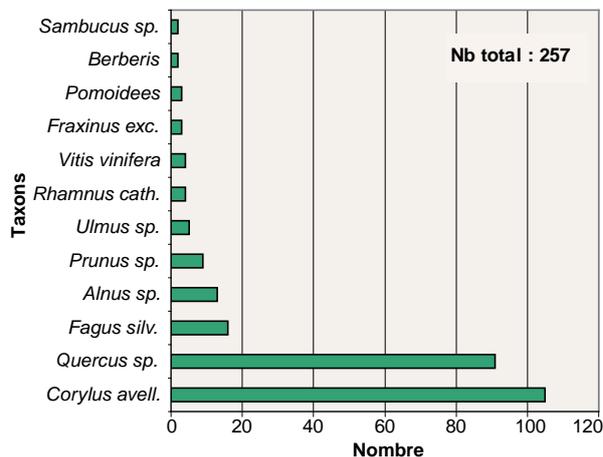


Figure 4 - Représentation taxonomique des branchages du site de Rouen « Place de la Pucelle ».

Quant à Jouars-Ponchartrain, les puits de l'agglomération ont fourni nombre de couches humides pleines de branchages. Nous ne présentons ici qu'une couche riche d'informations et qui démontre la présence de jardins, seul type de lieu qui peut être commun à ces essences d'hydrologie et d'ensoleillement divers. Arrosage, ombrage et protection contre le gel ou les

prédateurs permettent cette variété regroupé en un lieu unique (Dietrich, 1996 et à paraître ; Figure 5).

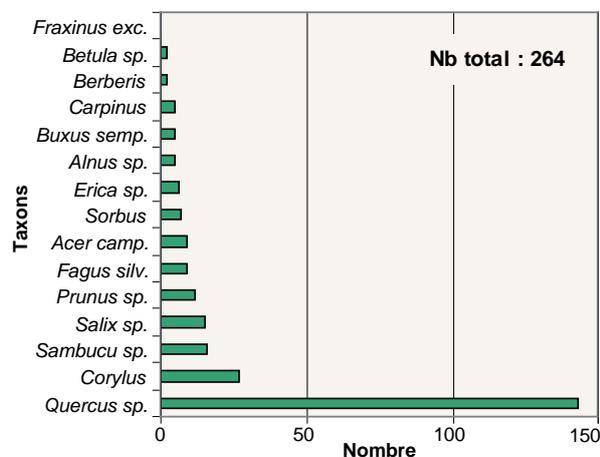


Figure 5 - Représentation taxonomique des branchages du site de Jouars-Ponchartrain.

A Meaux (Bet et al, 2008) aussi, l'image qui ressort des branchages du puits est celle d'un jardin, en contexte rural (villa). Les essences ligneuses identifiées sur ce site renvoient à un hortus soigné, aux plantes sélectionnées pour leurs vertus fruitières (prunoïdées, pomoïdées, noisetier, noyer), curatives (frêne, buis, chêne, merisier, prunellier, saule, clématite, chèvrefeuille, tilleul, bouleau, charme, fusain, gui, noyer) ou décoratives (buis, laurier-rose ; Lecomte-Schmitt 2008 ; Figure 6).

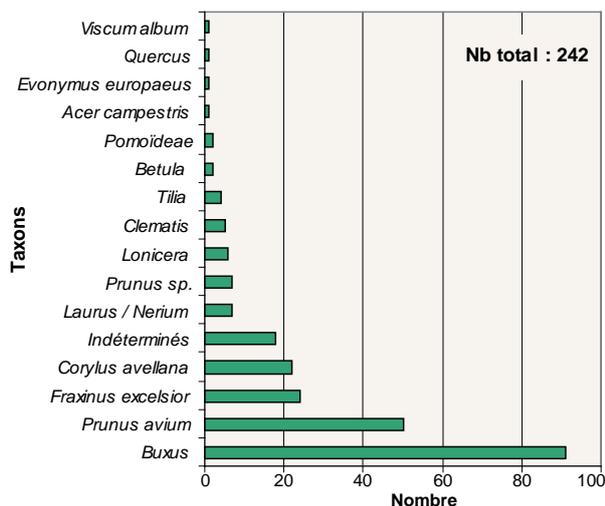


Figure 6 - Représentation taxonomique des branchages du site de Mareuil-lès-Meaux « la villa gallo-romaine et La Grange-du-Mont ».

c - Le Moyen-âge

Les assemblages taxonomiques de Neuvy et de Montévrain montrent des formations radicalement dif-

férentes. La Tour de Vesvre à Neuvy-deux-Clochers a été construite sur une butte (Mataoutchek, 2009) entourée à l'origine de bois assez denses (chêne, charme, érable, pomoïdées et prunoïdées d'après les vestiges de bois) d'où semblent provenir la plupart des bois ayant servi à la construction d'une plate-forme de fondation sans exclure pour autant la présence d'une végétation plus hydrophile (saule, orme, frêne). La grande variété taxonomique prouve la richesse du milieu environnant sans exclure l'utilisation, notamment pour les fragments assez calibrés de noisetier, d'un lot inutilisé (ou réquisitionné ?) de tiges possiblement destinées à un artisanat tressé (Figure 7).

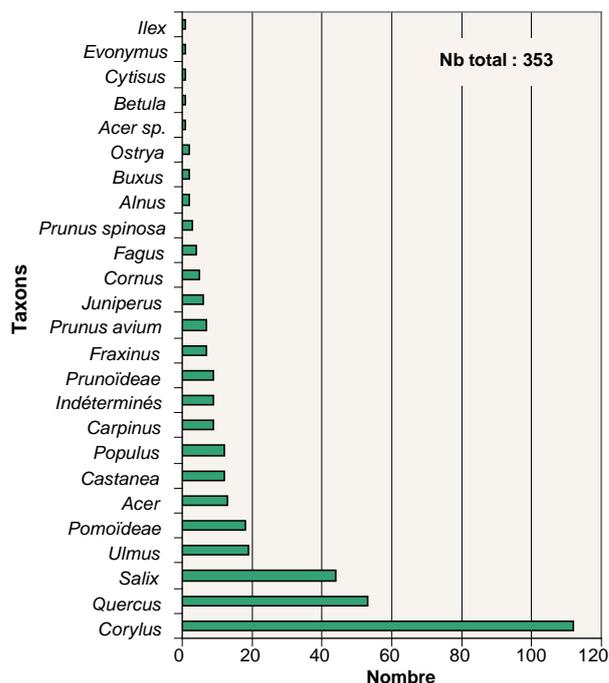


Figure 7 - Représentation taxonomique des branchages du site de Neuvy-deux-Clochers « Tour de Vesvre ».

A Montévrain, en pleine campagne, ce sont cette fois des tas de branchages de fruitiers (prunellier, cornouiller, noisetier) coupés en été qui ont été retrouvés à proximité d'une fosse à eau non loin d'un ru désormais atterri. Nous pouvons formuler l'hypothèse d'une coupe de branches en vue de la récolte des fruits, que l'on peut imaginer avoir été lavés dans la fosse aménagée d'un fragment de tronc de chêne évidé (Figure 8).

Pour Etampes, notre vision est biaisée du fait du milieu urbain et du contexte de découverte : dans les latrines, les trois principaux taxons, qui écrasent tout le reste, sont le prunellier, les pomoïdées et la vigne (mais aussi noisetier et chou), reliefs d'une partie de l'alimentation végétale de l'époque : nous sommes cette fois en contexte de cour ou de petit jardin ou verger en arrière de maisons de centre ville.

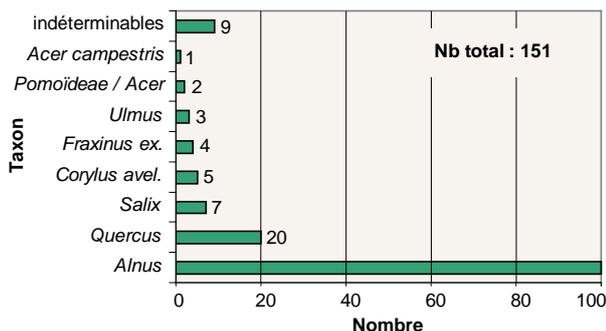


Figure 8 - Représentation taxonomique des branchages médiévaux du site de Montévrain « Le Clos Rose ».

2 - Le rapport âge / diamètre

Les branchages que nous étudions ont en commun leur petit diamètre et leur jeune âge. Si cette affirmation peut sembler banale, certaines constantes semblent révélatrices d'un choix dans la récolte des tiges et d'usages particuliers du bois. Ainsi à Tourville-la-Rivière, le noisetier découvert dans le paléochenal (IV^e s. av. J.-C.) est associé à une végétation de milieu ouvert. Les jeunes branches sont âgées de moins de 10 ans. Mais au vu du petit nombre de fragments, il est difficile d'aller plus loin dans les interprétations (Dietrich, 2004 a ; Figure 9).

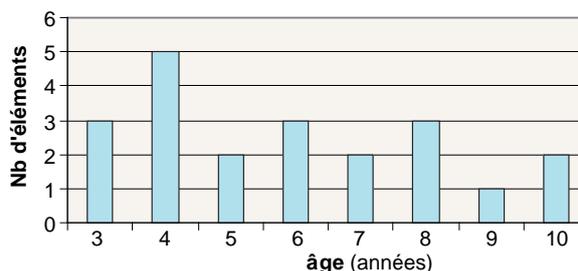


Figure 9 - Les âges du noisetier sur le site de Tourville-la-Rivière.

d - Une constante

Une constante se dégage donc des exemples exposés ci-dessus : la variété des lieux d'approvisionnement, en particulier des formations ouvertes (haies, lisières, ripisylves). L'artisanat et la cueillette de baies et fruits plus ou moins sauvages exploitent aussi bien des bois clairs que des haies naturelles ou entretenues ou des arbres isolés. Les diverses périodes culturelles recoupées par nos échantillons semblent démontrer que ce choix de l'espèce dépend du choix de la zone-ressource et de sa proximité : l'homme va au plus près et au plus pratique. Nous trouvons ici une différence logique avec la recherche de pièces de bois spécifiques ou de grandes dimensions qui réclame de parcourir de plus longues distances et de s'approvisionner à d'autres sources. Cette variété constante rejoint une forte récurrence de certaines essences telles le noisetier, le saule, le chêne ou encore les prunus. La lecture plus facile sur les cernes de noisetier fait que nous l'utilisons comme exemple pour les âges et les diamètres, bien que le noisetier semble parfois oublier de former certains cernes annuels de croissance (Bernard *et al.*, 2010).

Les noisetiers du puits de Lieusaint (IV-V^e s.) ont des diamètres compris entre 1 et 2,5 cm. Le diamètre des saules est inférieur à 1,5 cm. La variation des âges pour un même diamètre tend à montrer que le critère de sélection des tiges est bien le diamètre. Par ailleurs, la distinction diamétrale entre les deux essences tend à prouver des usages différents : des restes de cerclages constitués de demi-brins de noisetier avec ligatures de jeunes tiges de saule (diamètre env. 0,5 cm) bloquées dans des encoches témoignent d'une première utilisation spécifique des tiges. On peut également imaginer des ouvrages en vannerie, artisanat sélectionnant les essences pour leur souplesse de mise en forme (Figures 10 et 11).

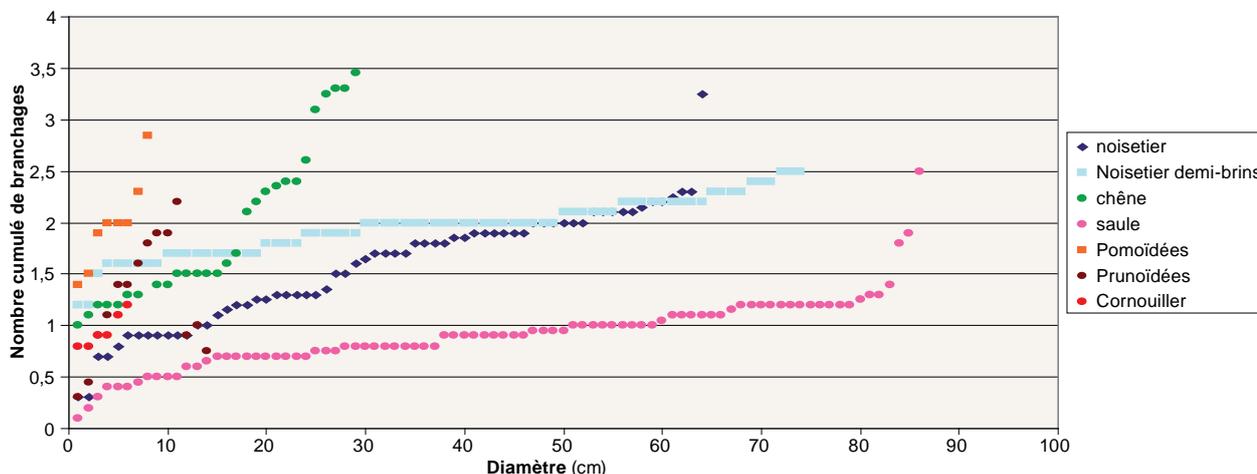


Figure 10 - Les diamètres des tiges découvertes dans le puits de Lieusaint « Zac de la Pyramide » lot E2D4.



Figure 11 - Demi-brins de noisetier ligaturés de saule. Lieusaint « Zac de la Pyramide » lot E2D4. Cliché B. Lecomte-Schmitt.

Deux groupes de branchages de chêne d'âges différents (moins de 8 ans et 18 ans ou plus,) ont été observés sur le site de Magny-le-Hongre ZAC Courtalin. Ils peuvent correspondre à deux usages possibles ou alors à deux provenances. Il est évident que cela ne reflète pas l'ensemble de la couronne d'un chêne car il y a un hiatus dans les âges présents entre 7 et 16 ans. L'âge des brins de noisetier est proche du premier groupe de chêne : s'agit-il de sélection de diamètres similaires ? (Figure 12).

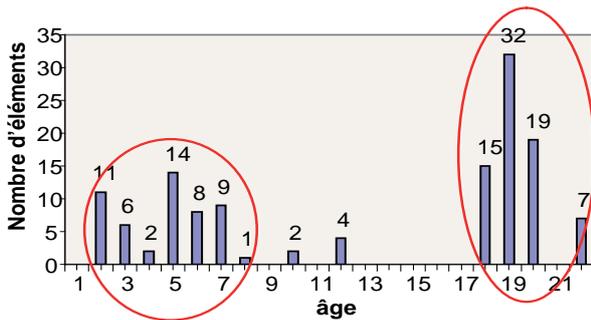


Figure 12 - Les âges des tiges de chêne à Magny-le-Hongre « Zac Courtalin » lot 2.6.

Les principales essences ayant participé à la construction de la plate-forme du X^e s. de la tour de Vesvre ont des diamètres là encore très proches, pour la très grande majorité inférieurs à 2 cm. Pour autant les âges sont variés : 5 à 10 ans pour le chêne et le noisetier, moins de 5 ans pour le saule. Si le calibre des tiges semble de nouveau présider au choix qui est fait, on constate que le saule a une croissance beaucoup plus rapide que le chêne et le noisetier, qui pourraient

provenir des mêmes formations (Figure 13).

Il apparaît donc que le diamètre est un critère de choix bien plus que l'âge des tiges, ce qui n'exclut pas pour autant une gestion de la récolte de ces jeunes tiges selon des rotations raisonnées. Il s'agit bien de la sélection d'un calibre pour un usage donné, dont le plus évident est le domaine artisanal.

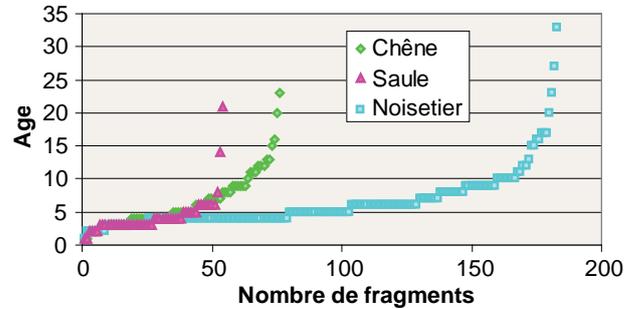


Figure 13 - Les âges des tiges découvertes sur le site de Neuvy-deux-Clochers « Tour de Vesvre ».

3 - Une activité saisonnière ?

Les vestiges des structures anthropiques, quelque soit la période considérée, montrent une récolte hivernale. C'est le cas des noisetiers de Tourville-la-Rivière au IV^e s. av. J.-C., mais aussi de ceux de Lieusaint découverts dans les couches bas-empire / mérovingiennes. Il s'agit ici de brins et demi-brins fendus et encochés, fruits de la confection ou de la réparation de cerclages végétaux ligaturés en saule pour ouvrages de tonnellerie, ainsi que de jeunes tiges de saule et d'autres espèces (cornouiller, pomoidées) dont les traces de compression attestent un usage tressé (vanterie) (Figure 14).

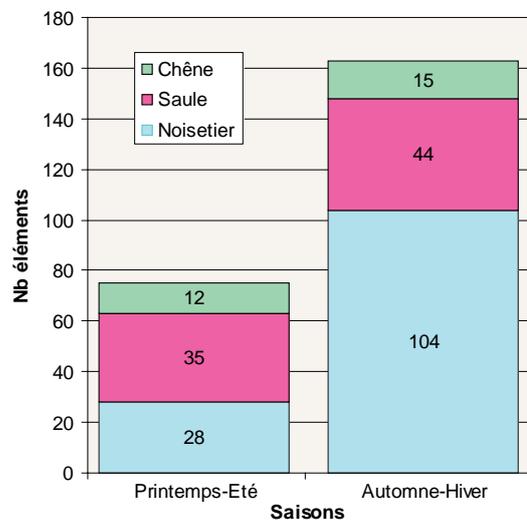


Figure 14 - Saisonnalité date d'abattage ou date de mort ? relevée dans le puits de Lieusaint « Zac de la Pyramide » lot E2D4.

A l'inverse, si ce sont les fruits qui sont recherchés, les structures anthropiques livrent alors des branchages d'essences fruitières coupées en été ou à la fin de l'été (prunellier, cornouiller, noisetier), comme c'est le cas à Montévrain (fosse à eau du XII-XIV^e s.) ou encore à Etampes (XIV-XVII^e s.) où prunellier et autres prunoïdées et pomoidées sont également consommés en été. Pour la vigne, le motif particulier des cernes ne permet pas toujours d'établir la saison de coupe des sarments. Par ailleurs le bois des espèces cultivées et sauvages n'est pas dissociable anatomiquement et nous ne pouvons distinguer récolte et culture. De même les noisettes arrivent également à maturité à l'automne. La récolte est logiquement plus tardive et les deux usages, artisanal et alimentaire, peuvent être concomitants.

Pour les structures plus ouvertes comme les mares et les ruisseaux, toutes les saisons sont représentées, avec des chutes hivernales que l'on est tenté de lier aux intempéries (exemple de Montévrain) ou à l'assè-

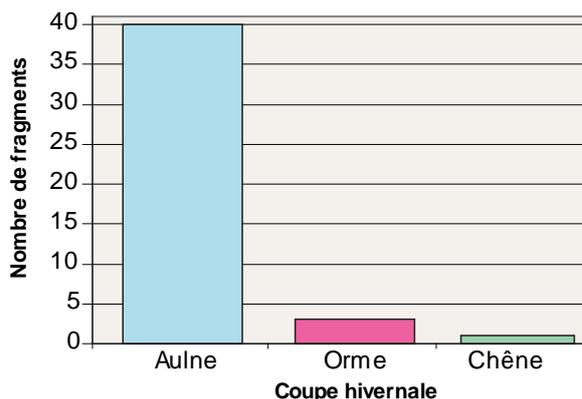


Figure 15 - Saisonnalité de la mare de Montévrain « Le Clos Rose ».

chement estival d'une mare de Lieusaint avec le dépérissement des ormes peuplant les berges (Figure 15).

III - APPORT DE L'ETUDE DENDROLOGIQUE DES BRANCHAGES : UN DÉBUT DE SYNTHÈSE

La classification phytosociologique utilisée (Bournerias, 1979) ne tient pas compte du facteur anthropique, ce qui ne correspond donc jamais à l'environnement des sites étudiés.

Afin d'éviter une interprétation trop hâtive faite sur des modèles forestiers inadaptés aux milieux ouverts, nous présentons les données dans l'état le plus neutre possible. Ainsi nous n'avons pas regroupé les plantes par type de milieu comme pour la palynologie ou l'anthracologie. Ces deux disciplines le font à bon escient quand les données s'étalent sur le long terme et qu'elles concernent des corpus importants. Ce n'est pas notre cas ici. Pour les mêmes raisons, nous n'avons pas utilisé de pourcentage mais des NMI (nombre minimum d'individus) déterminés après les remontages de la fragmentation. En effet, nous nous sommes aperçus que la présentation chiffrée et pré-organisée de ces résultats influe beaucoup sur l'interprétation des données (Dietrich, 2009). Les corpus de branchages étudiés semblent provenir de paysages plutôt ouverts (Rameau *et al.*, 1989). Les milieux fermés ne sont pas absents pour autant, et si l'ensemble n'est pas forestier, les massifs semblent être la zone de ressource pour les bois de construction et du combustible (au moins pour partie). Ces bois de plus grosses sections montrent des croissances lentes bien repérées sur les pièces de chêne et de hêtre. Certains branchages, peu nombreux il est vrai, pourraient avoir été prélevés parmi ces massifs plus fermés. L'exemple de Jossigny avec des branchages de chêne à croissance relativement lente, correspondrait à des déchets de l'abattage de grands arbres forestiers. La forte proportion de branchages rectilignes, avec peu de traces de départs de pédoncules de feuilles résulte sans doute d'une gestion de cépées au sens large. Il nous est en effet difficile de distinguer

un taillis plus ou moins dense mais qui correspond à un massif boisé mature et géré, de cépées plus éparées présentes dans les haies ou les bosquets, voire les jardins. Enfin, les lisières et manteaux font partie des massifs forestiers puisqu'ils en constituent les bourrelets (Bary-Lenger *et al.*, 1988). Les limites entre ces entités restent floues tant les possibilités d'adaptation des plantes sont grandes. Beaucoup sont d'ailleurs ubiquistes et au premier rang le chêne qui peut appartenir à nombre de biotopes. Les milieux et situations de croissance de certaines espèces sont ainsi démultipliés, aussi nombreux que les sites anthropiques d'où nos vestiges ligneux proviennent. Exploités par l'homme qui y prélève selon les besoins, il s'agit de situations en évolution constante. Ces bois tendent alors vers des équilibres de gestion des arbres et massifs arborés ou au contraire de levée de la contrainte anthropique.

Les résultats des observations sur l'ensemble du corpus indiquent une exploitation large des cépées. La localisation typologique des milieux d'origine ne peut être déduite de la seule analyse xylogique. Il faut utiliser l'ensemble des disciplines botaniques et archéologiques pour répondre aux milieux exploités. Une vision globale à partir d'éléments regroupés par microrégion et par période culturelle ne peut se faire que si les données sont homogénéisées avec un report systématique des morphologies des branchages, leur âge, leur diamètre et la saison de la récolte. Ces informations sont de plus en plus fréquemment reportées dans les enregistrements des bois archéologiques, mais nécessitent du temps afin de pouvoir être systématiquement notées. Or tout ces paramètres sont à prendre en compte pour déterminer les types de vestige (naturel/anthropique), d'usage (alimentation, artisanat, autre), les critères de sélection, la saisonnalité éven-

tuelle des activités. Le recrutement de branchages et brindilles répond à un besoin vaste et varié que nous devons mieux cerner et que nous ne faisons, au mieux, qu'effleurer.

Les activités rurales, artisanales et alimentaires sont extrêmement nombreuses et exploitent pratiquement toutes les essences. Nous avons perdu la connaissance de la plupart de ces usages anciens, qui étaient pourtant des fondamentaux de la vie quotidienne, dans des sociétés où tous n'avaient pas toujours accès aux réseaux organisés de distribution et de gestion des ressources. Si les branchages de saule ou de noisetier sont en si grand nombre c'est qu'ils répondent peut être au besoin d'une matière première spécifique à certains métiers. Le menu bois était par ailleurs accessible à toute la population et a pu se substituer ponctuellement aux essences traditionnellement associées à certains ouvrages. A Paris-Musée du Quai Branly (Lecomte-Schmitt 2004), les claies sont ainsi réalisées dans du tout venant (aulne, frêne, pomoidées, érable, noisetier et orme) sans souci d'homogénéité.

La vie domestique est liée à la relation des populations avec ce qu'offrait la «nature» nous semble vaste et insaisissable. Cependant la récurrence de certaines essences et la morphologie restreinte qui est ici utilisée en forment quelques uns des indices. Dans ce constat, le noisetier prend une place particulière. Dans les structures ouvertes de type mare ou ruisseau, où l'accumulation des vestiges organiques semble liée à des dépôts naturels, le noisetier est faiblement représenté avec un taux global inférieur à 4%. En revanche, dans les structures anthropiques comme les puits, le noisetier représente le quart voire la moitié du total des branchages. Dans de telles proportions, nous ne pouvons pas considérer le noisetier comme étant simplement un arbuste de reconquête. Ces rejets sont spécifiques et sont liés pour une grande part à une activité artisanale très développée aux périodes gallo-romaine et médiévale. Mieux saisir l'utilisation du noisetier passe par un travail transchronologique de recherche sur des corylaies naturelles et des cultures gérées, la représentation des récoltes et des arbres exploités (groupés ou isolés). Il faut également s'attacher à rechercher l'occurrence de la plante au travers des autres disciplines botaniques avec un regard particulier pour les noisettes et leurs utilisations alimentaires et symboliques.

Dans la même logique de recherche, d'autres essences récurrentes sur les sites archéologiques pourraient être particulièrement intéressantes à développer sous forme monographique, comme l'aulne, le saule, l'orme ou le prunellier. Chaque espèce recèle une particularité que nous ignorons encore car les branchages seuls et les données repérées sont trop partiels. Les lots doivent être regardés de près et les fiches morphologiques sans doute nettement plus détaillées. Beaucoup

de ces usages, antiques, alto-médiévaux puis médiévaux ne répondent pas à notre logique actuelle. Il nous semble qu'ils s'inscrivent dans la continuité. C'est toute une recherche qui peut être initiée à partir des branchages dont nous posons ici les premiers jalons. Par exemple les données sur la période médiévale sont encore très clairsemées et nous devons augmenter le corpus général sur les périodes allant du XI^e au XV^e siècle. Ainsi nous pourrions déterminer si le prunellier, largement présent sur les sites médiévaux de Montévrain et d'Etampes, peut être considéré comme un arbre de reconquête et expliquer la raison de l'utilisation de ces populations spécifiques à cette période. Et si l'image reste très proche de la période précédente pour ce qui concerne la saison, et les âges et diamètres des branchages, peut-être pourrions-nous mieux appréhender la question de la gestion des ressources et rechercher des différences.

Le travail méthodologique et la théorisation de nos données suivent par ailleurs les progrès archéologiques, en particulier de l'archéologie préventive. Le constat présent pose des questions méthodologiques, en particulier celle de la comparaison des corpus (Johnson, 2007) entre des structures archéologiques différentes comme le sont les puits, les mares, les fossés et les chenaux. Il semble en effet que ce ne soient pas les mêmes phénomènes de dépôt qui président à l'accumulation des branchages dans ces structures. La détermination des phénomènes taphonomiques qui régissent les dépôts de branchages diffèrent-ils au point de rendre les comparaisons caduques ? Comment rendre ces rapprochements pertinents ? La nature du rejet est encore mal comprise pour les couches profondes des puits (Dietrich, à paraître) mais aussi pour les mares et les fossés. Les études morpho-botaniques permettent de poser des hypothèses sur l'artisanat, l'aménagement de l'espace, l'entretien des jardins et la gestion des déchets, en particulier ceux de la litière souillée et du fourrage abandonné.

C'est par les observations sur les évidences de bois vert ou bois mort (démontrés par la perte de l'écorce et les galeries des xylophages), sur la saison de récolte ou de chute des branches (ramassage après une tempête), sur les taux de croissance et la régularité de la pousse de ces branchages que nous pouvons améliorer nos connaissances.

C'est donc un plaidoyer que nous nous permettons de défendre ici pour consacrer une partie de la recherche environnementale à ces branchages même si les couches impliquées sont des couches de rejets et donc ne datent que rarement de la même époque que la structure qu'elles comblent. Si nous retrouvons des espèces identiques d'un site à l'autre, si nous palpons des similitudes dans l'utilisation de la ressource branchages, tout est loin d'être compris.

BIBLIOGRAPHIE

- BARY-LENGER A., EVRARD R., GATHY P., 1988. La forêt: écologie, gestion, économie, conservation. Ed du Perron, Liège, 619 p.
- BERNARD V., BILLARD C., JAUEN G., SANDS R., 2010. Hétéroconnexions de courtes séries dendrochronologiques et tracéologie : le cas des bois de pêcheries du début de l'Age du Bronze en baie du Mont-Saint-Michel. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009. *Collection EDYTEM*, 11, 175.
- BERTHAUD G. (dir.), 2000. Mazières-en-Mauges gallo-romain (Maine-et-Loire). ASG, Angers.
- BET Ph., BOJARSKI M., GOSSELIN R., 2008. Mareuil-lès-Meaux : la villa gallo-romaine et l'atelier de sigillée tardive de La Grange-du-Mont (Seine-et-Marne). Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin.
- BOURNERIAS M., 1979. Guide des groupements végétaux de la région parisienne. Masson, Paris.
- DIETRICH A., 1993. Les bois naturels de Servon. In GENTILI F. (dir.). Villa gallo-romaine et habitat du Haut Moyen-âge. Servon « l'Arpent Ferret » (77). Afan Centre-Ile-de-France.
- DIETRICH A., 1996. Etude xylogologique des puits de Jouars-Ponchartrain. In BLIN O. (dir.). Rapport de fouilles de Jouars-Ponchartrain (78). Inédit, 18 p.
- DIETRICH A., 1997. Etude xylogologique des bois antiques. In BILLARD C. et LANGLOIS J.-Y. Rouen « place de la pucelle ». Document Final de Synthèse, Inrap, Cesson-Sévigné.
- DIETRICH A., 2000. Les branchages. In BERTHAUD G. (dir.). Mazières-en-Mauges gallo-romain (Maine-et-Loire). ASG, Angers, p 195-198.
- DIETRICH A., 2004 a. Commentaire sur les éléments ligneux du site de Tourville-la-rivière. Rapport de fouilles de Tourville-la-rivière (60). Inrap, rapport interne, Cesson-Sévigné.
- DIETRICH A., 2004 b. Etude xylogologique. In DESRAYAUD Gilles. Magny-le-Hongre (Seine-et-Marne), ZAC de Courtalin « Lot 2.6 » : Aménagements hydrauliques ruraux du Haut-Empire (à fonction pastorale ?). Rapport de fouilles, Inrap, Pantin, p. 34.
- DIETRICH A., 2005. Les branchages du puits de l'Echangeur A4. In GUY H., DESRAYAUD G. collab. Jossigny et Serris (Seine-et-Marne), Le Parc de la Motte-les-Collinières : Echangeur et sud de la Pénétrante Ouest de l'A4 : Préhistoire, Néolithique, Antiquité (établissement ruraux et réseaux fossoyés), haut Moyen Âge et période moderne. Rapport de fouilles, Pantin : Inrap CIF, 225 p.
- DIETRICH A., 2008. Rapport d'étude xylogologique du site de Brissay-Choigny. In OUDRY S. (dir.). Rapport de fouilles Brissay-Choigny « Les Courts Marchés » (Aisne). Inrap, Amiens, à paraître.
- DIETRICH A., 2009. Trees and forests : forestry concept confronted to botanical corpus from preventative archaeology. In session "Environmental Archaeology in France", World Congress Environmental History, Copenhagen, août 2009, à paraître.
- DIETRICH A., à paraître. Que disent les vestiges d'arbres et d'arbustes trouvés dans les puits sur les jardins ? In Archéologie des jardins : analyse des espaces et méthodes d'approche, thèmes transversaux d'ArScan, thème 7 outils et méthodes de la recherche - janvier 2010.
- DIETRICH A., LECOMTE-SCHMITT B., à paraître. Résultats xylogologiques depuis 20 ans en Ile-de-France : une étude de l'homme au travers des brindilles. Actes du colloque Des hommes et des plantes : exploitation du milieu et gestion des ressources végétales de la préhistoire à nos jours, XXX^e Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, Antibes-Juan-les-Pins, 22-24 octobre 2009.
- JOHNSON M., 2007. Ideas of Landscape. Blacwell publishing, USA, 242p.
- LECOMTE-SCHMITT B. 2004. Paris - Musée du Quai Branly : Rapport d'étude xylogologique. Document dactylographié inédit, 116 p.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2007 a. Etampes « rue du Rempart » : étude xylogologique. In PEIXOTO X. et CELLY P. (dir.). Etampes « rue du Rempart ». Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin, à paraître.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2008. Etude xylogologique. In BET Ph., BOJARSKI M., GOSSELIN R. Mareuil-lès-Meaux : la villa gallo-romaine et l'atelier de sigillée tardive de La Grange-du-Mont (Seine-et-Marne). Rapport Final d'Opération, vol. 3, Inrap, Pantin, p. 1061-1075.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2008. Etude xylogologique du puits 5003. In SÉGUIER J.-M., AUXIETTE G., COUBRAY S., DELAGE R., DELATTRE V., LECOMTE-SCHMITT B., MATTERNE V., PEAKE R., VAN OSSEL P., WATTEZ J., 2007. Varennes-sur-Seine, le Marais du Colombier (Seine-et-Marne) : Occupations Néolithique, protohistorique et gallo-romaine. Rapport Final d'Opération. Inrap, Pantin, p. 72-77.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2009 a. Etude des bois. In RENEL F., CASSAN F.-X., KONIK S., LECOMTE-SCHMITT B., VIRÉ M., BOULENGER L., HENRY-DUPLESSIS S., TROMBETTA P.-J., ALLENET DE RIBEMONT G. Tigery «ZAC Pépinière», Ile-de-France – Essone (91). Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin, 98-127.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2009 b. Bois de Neuvy : Synthèse provisoire de l'inventaire. In MATAOUCHEK V. (Dir.). Neuvy-Deux-Clochers, Tour de Vesvre (Cher-Centre). Inrap, Pantin, 4 vol.
- LECOMTE-SCHMITT B., 2009 c. Lieusaint E2D4 : Artisanat du bois et environnement arboré. In MONDOLONI A. (DIR.). Lieusaint «ZAC de la Pyramide», lots E2 D4. Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin, en cours.
- LECOMTE-SCHMITT B. à paraître. Montévrain «Le Clos Rose» 2006 : Evolution du paysage boisé entre l'Antiquité et le Moyen âge. In BERGA A. (DIR.). Montévrain «Le Clos Rose». Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin, à paraître.
- MATAOUCHEK V. (Dir.), 2009. Neuvy-Deux-Clochers, Tour de Vesvre (Cher-Centre). Inrap, Pantin. 4 vol.
- RAMEAU J., MANSION D., DUME G., 1989. Flore forestière française. Vol. I et II, IDF, Paris.
- RENEL F., CASSAN F.-X., KONIK S., LECOMTE-SCHMITT B., VIRÉ M., BOULENGER L., HENRY-DUPLESSIS S., TROMBETTA P.-J., ALLENET DE RIBEMONT G., 2009. Tigery «ZAC Pépinière», Ile-de-France - Essone (91). Rapport Final d'Opération, Inrap, Pantin.
- SÉGUIER J.-M., AUXIETTE G., COUBRAY S., DELAGE R., DELATTRE V., LECOMTE-SCHMITT B., MATTERNE V., PEAKE R., VAN OSSEL P., WATTEZ J., 2007. Varennes-sur-Seine, le Marais du Colombier (Seine-et-Marne) : Occupations Néolithique, protohistorique et gallo-romaine. Rapport Final d'Opération. Inrap, Pantin.

DATATION DENDROCHRONOLOGIQUE DU BÂTI TRADITIONNEL ET OCCUPATION HUMAINE DANS LES ALPES FRANÇAISES DU SUD AU COURS DU DERNIER MILLÉNAIRE

*DENDROCHRONOLOGICAL STUDY OF TRADITIONNAL CONSTRUCTIONS AND HUMAN OCCUPATION
DURING THE LAST MILLENIUM IN THE FRENCH SOUTHERN ALPS*

JEAN-LOUIS ÉDOUARD

*Centre Camille Julian, UMR CNRS 6573, Maison Méditerranéenne des Sciences de l'Homme et de
la Société, 5 Rue du château de l'Horloge, BP 647, F 13094 Aix-en-Provence cedex 2.*

Contact : edouard@msh.univ-aix.fr

RÉSUMÉ

Les constructions traditionnelles de montagne, notamment les granges, constituées d'empilages de bois, pièces sur pièces, en mélèze, sont une source de données exploitables par la dendrochronologie. L'analyse dendrochronologique de nouveaux bâtiments, la chapelle Saint-Romain de Puy-Saint-Vincent (massif des Ecrins) et des chalets-granges du Mercantour, révèle des dates d'abattage très anciennes remontant à la deuxième moitié du XII^e siècle comme nous l'avons déjà mis en évidence dans la vallée de la Clarée, et de la fin du XV^e siècle au début du XX^e siècle, dans le Mercantour. Ces résultats confirment l'importance historique de ce patrimoine architectural traditionnel alpin.

MOTS-CLÉS : DENDROCHRONOLOGIE, DERNIER MILLÉNAIRE, LARIX DECIDUA (MILL.), CHRONOLOGIE DE RÉFÉRENCE, HABITAT TRADITIONNEL, ALPES FRANÇAISES, ECRINS, BRIANÇONNAIS, MERCANTOUR, HAUTES ALPES, ALPES MARITIMES.

ABSTRACT

Traditional mountain buildings, including barns, consisting of horizontal joint of larch wooden timbers (blockbau), are a source of data analyzed by dendrochronology. The dendrochronological analysis of buildings, the chapel of St Romain (Puy-Saint-Vincent, massif des Ecrins), barns in Mercantour, reveal ancient felling dates back to the second half of the XIIth century as in the valley Clarée, and the late XVth century to early XXth century in the Mercantour. These results confirm the historical importance of this traditional alpine architectural heritage.

KEYWORDS: DENDROCHRONOLOGY, LAST MILLENIUM, LARIX DECIDUA (MILL.), MASTER CHRONOLOGY, TRADITIONNAL BUILDING, FRENCH ALPS, ECRINS, BRIANÇONNAIS, MERCANTOUR.

INTRODUCTION

L'étude dendrochronologique de plusieurs chalets-granges dans la vallée de la Clarée (Névache, Briançonnais) a montré l'ancienneté de l'habitat qui, dans l'état actuel de la recherche, remonte à la deuxième moitié du XII^e siècle, et sa permanence jusqu'à la fin du XIX^e siècle, sur près de 800 ans sur les mêmes sites (Edouard, 2010). Une chronologie locale de cernes a été construite sur une période de 1250 ans. L'objectif de cet article est de rechercher si :

- les chalets-granges témoignent d'un habitat d'altitude dans toutes les Alpes du Sud pendant les périodes moderne et contemporaine ;

- l'occupation humaine à la fin du XII^e siècle, subsiste aussi dans d'autres vallées des Alpes du Sud.

Pour cela, le lot de données dendrochronologiques construites à partir d'une quinzaine de bâtiments de la vallée de la Clarée a été enrichi avec l'étude de bâtiments situés dans le massif des Ecrins proche, et dans le massif du Mercantour, à l'extrémité sud des Alpes françaises.

I - SITES, MATÉRIEL ET MÉTHODE

1 - Les sites étudiés

Quatre nouveaux bâtiments sont étudiés dans cet article (Figures 1 et 2) :

- la chapelle Saint Romain, à 1396 m d'altitude sur le territoire de la commune de Puy-Saint-Vincent, dans la vallée de la Vallouise (Ecrins) ;
- trois bâtiments traditionnels, des chalets-granges d'estive, caractérisés par une structure en bois de mélèze (*Larix decidua* Mill.), de type à empilage (blockbau ou empilage des bois pièce sur pièce avec assemblage à mi-bois) et toit de bardeaux (Mallé, 1999).

Ces trois derniers bâtiments sont situés sur le territoire de la commune de Saint Dalmas le Selvage, dans la haute vallée de la Tinée (Mercantour). Le chalet-grange Pra, partiellement démonté, est implanté sur un épaulement à la confluence des vallons de Gialorgues et de Sestrière, à 1800 m d'altitude. Les deux autres bâtiments sont localisés au lieu-dit Sestrière à la confluence des vallons de La Braise et de Moutière, à 2010 et 2020 m d'altitude, à environ 2 km du précédent : le chalet-grange Sestrière-1, composé d'une grange traditionnelle en mélèze et d'un petit bâtiment contigu en pierre sur lequel porte l'analyse et le chalet-grange Sestrière-2, semblable au précédent, en cours de restauration au moment de l'étude (Figure 3).

Les autres constructions auxquelles il est fait référence dans la synthèse chronologique (paragraphe II-3 ci-dessous) sont situées dans la vallée de la Clarée (voir leur description dans Edouard, 2010).

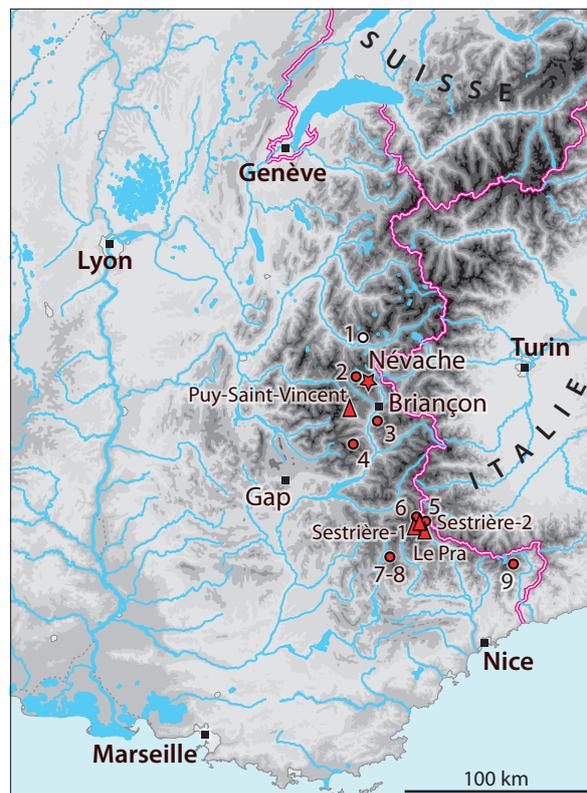


Figure 1 - Localisation des sites d'étude (Puy-Saint-Vincent, Sestrière 1 et 2, Pra et Névache) et des chronologies de référence.

| Bâtiment | Région | Latitude | Longitude | Altitude |
|-------------------|------------|----------|-----------|----------|
| Puy-Saint-Vincent | Ecrins | 44.834 N | 6.484 E | 1396 m |
| Pra | Mercantour | 44.285 N | 6.855E | 1765 m |
| Sestrière-1 | Mercantour | 44.293 N | 6.833E | 2010 m |
| Sestrière-2 | Mercantour | 44.293 N | 6.833E | 2020 m |

Figure 2 - Localisation des bâtiments prélevés.



Figure 3 - Chalet-grange Sestrière-2 (Saint Dalmas le Sauvage, Mercantour).
Photo J.-L. Edouard.

2 - Méthode

La dendrochronologie est présentée dans de nombreux articles et ouvrages (Schweingrüber, 1988 ; Lambert, 1998 ; Hoffsummer, 2002). L'analyse dendrochronologique en attribuant à chaque cerne l'année calendaire exacte de sa formation, permet la datation absolue d'événements, d'objets. La datation concerne l'abattage de l'arbre, qui peut être précise à l'année près. Le délai entre abattage et utilisation du bois étant généralement court (quelques mois) dans la charpenterie (Hoffsummer, 2002, et communication orale de charpentiers de montagne), la date d'abattage fournit une approche précise de la date de première utilisation des bois pour la construction et la construction elle-même s'il n'y a pas remploi.

a - Prélèvements

C'est 95 sections de bois qui ont été prélevées en fonction des possibilités offertes par les travaux de restauration.

A la chapelle St-Romain, la restauration portait sur la flèche en pierre du clocher. Les travaux ont dégagé le coffrage intégré à l'assemblage des pierres, constitué de 4 chevrons disposés en cône à base carrée et de planches trapézoïdales dans la partie supérieure de la flèche (Figure 4). Après démantèlement du coffrage, 22 sections ont pu être prélevées (4 chevrons et 18 planches).

Les chalets Pra, Sestrière-1 et Sestrière-2 ont fourni respectivement 20, 9 et 44 sections à partir d'éléments

démontés, de tronçons de poutres (poteaux, poinçons, sablières, solives de plancher, chevrons, chapilas*) et des bardeaux.

b - Analyse dendrochronologique

Après identification des bois (Schweingrüber, 1990) et préparation des échantillons (ponçage), la mesure des largeurs des cernes a été réalisée au moyen de la table de mesures Lintab™ de Rinntech™. Les séries chronologiques obtenues ont été synchroni-

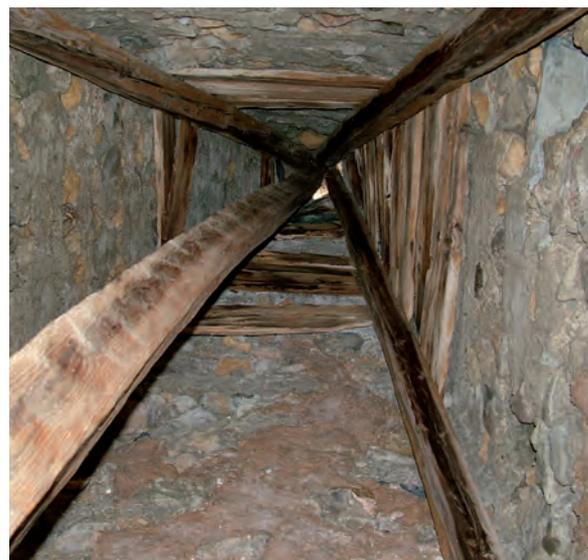


Figure 4 - coffrage de la flèche du clocher de la chapelle Saint-Romain (Puy-Saint-Vincent, 05). Photo S. Garin.

* *Chapila ou chapi* : terme désignant dans le Briançonnais les pièces de bois en mélèze (essentiellement) disposés en empilage (blockbau) constituant les murs des granges d'altitude.

sées sur la base de tests statistiques (pourcentage de concordance des variations interannuelles ou coefficient de coïncidence (Kaenel et Schweingruber 1996), et coefficient de corrélation des séries préalablement standardisées avec un niveau de confiance) couplés à l'observation visuelle, cela en mettant en œuvre les logiciels TSAPwin Scientific (Rinntech, 1996) et Dendron II (Lambert, 1998 ; Lambert, 2006).

Les chronologies synchronisées entre elles constituent des groupes pour lesquelles une chronologie

moyenne est calculée, puis datée sur les chronologies de référence existantes.

Pour cela, plusieurs longues chronologies du mélèze ont été utilisées, proches des constructions étudiées, construites à partir de vieux arbres situés en limite supérieure de la forêt subalpine, à des altitudes supérieures à 2000 m, et une chronologie établie à partir de bois de construction provenant de la haute vallée de la Clarée en amont de Névache (Figure 5).

| Référence | Auteur | Région | Latitude | Longitude | Altitude | Dates |
|----------------------|---------------------|--------------------------|----------|-----------|-------------|-----------------------|
| Orgère | Tessier (1986) | Vanoise-Maurienne | 45.219 N | 6.682 E | 2100 m | 1353-1973 |
| Chardonnet | Edouard (non publ.) | Briançonnais | 45.029 N | 6.538 E | 2150 m | 1492-1989 |
| Névache | Edouard (non publ.) | Briançonnais | 45.013 N | 6.571 E | 1800-2150 m | 751-1303 1357-2007 |
| Oriol | Edouard (non publ.) | Briançonnais | 44.796 N | 6.598 E | 2180 m | 1381-1989 |
| Fressinières | Edouard (non publ.) | Briançonnais | 44.725N | 6.505 E | 2100 m | 1475-1992 |
| Beauvezer 200 | Belingard (1996) | Mercantour (Haut-Verdon) | 44.115 N | 6.650 E | 2100 m | 1421-1993 |
| Beauvezer 400 | Belingard (1996) | Mercantour (Haut-Verdon) | 44.115 N | 6.650 E | 2100 m | 1160-1994 |
| Braisse | Edouard (non publ.) | Mercantour (Tinée) | 44.29 N | 6.81 E | 2050 m | 1414-1994 |
| Sestrière | Edouard (non publ.) | Mercantour (Tinée) | 44.3 N | 6.82 E | 2150 m | 1417-1994 |
| Merveilles | Serre-Bachet (1979) | Mercantour (Roya) | 44.051 N | 7.449 E | 2200 m | 933-1974 |

Figure 5 - Localisation et caractéristiques des chronologies de référence.

II - RÉSULTATS

1 - Caractéristiques des pièces de bois

Les pièces de bois échantillonnées sont en totalité façonnées dans des mélèzes (*Larix decidua* Mill.). Les bois des 3 chalets proviennent de la forêt de mélèze locale, située à proximité immédiate et ceux du clocher de la chapelle proviennent de la forêt située en amont dans le versant ou vers le col de Pousterle, très proche.

Les pièces de bois analysées, bien qu'elles n'aient pas été sélectionnées selon un protocole d'analyse architectural, s'avèrent suffisamment représentatives des éléments qui composent les bâtiments traditionnels : poutres (sablières, solives), poteaux, poinçons, chevrons, chapilas et aussi bardeaux (toiture). Par exemple, les pièces de bois du chalet Sestrière-2 montrent la diversité fonctionnelle des bois analysés même si leurs fonctions potentielles n'ont pas pu être toutes identifiées de façon certaine, car elles étaient stockées à côté du chalet en ruine : 2 poinçons, 10 poutres de sections petite à moyenne (solives et chevrons), 1 chapila et 7 bardeaux.

2 - datations dendrochronologiques

a - chalet-grange Pra

Les 36 rayons mesurés (1 à 3 rayons par section), donnent 20 séries individuelles (moyenne des rayons par section) correspondant aux 20 sections prélevées. Les deux séries individuelles les plus longues comportent plus de 250 cernes (261 et 277) et 10 séries ont plus de 150 cernes. Neuf bois avaient un aubier complet, 9 un aubier partiellement conservé et 2 bois étaient sans aubier, conditions favorables à l'obtention de dates d'abattage. Dix sept séries ont été synchronisées entre elles, réparties en deux groupes non synchrones, et datées ; 3 séries seulement n'ont pu être datées. Les chronologies moyennes des deux groupes couvrent au total une période de 460 années, depuis le milieu du XV^e siècle jusqu'au début du XX^e siècle : 1452-1623 (172 ans, 2 séries) et 1592-1911 (320 ans, 15 séries (Figure 6). Elles ont un chevauchement de 31 ans, très court, qui explique l'absence de synchronisme

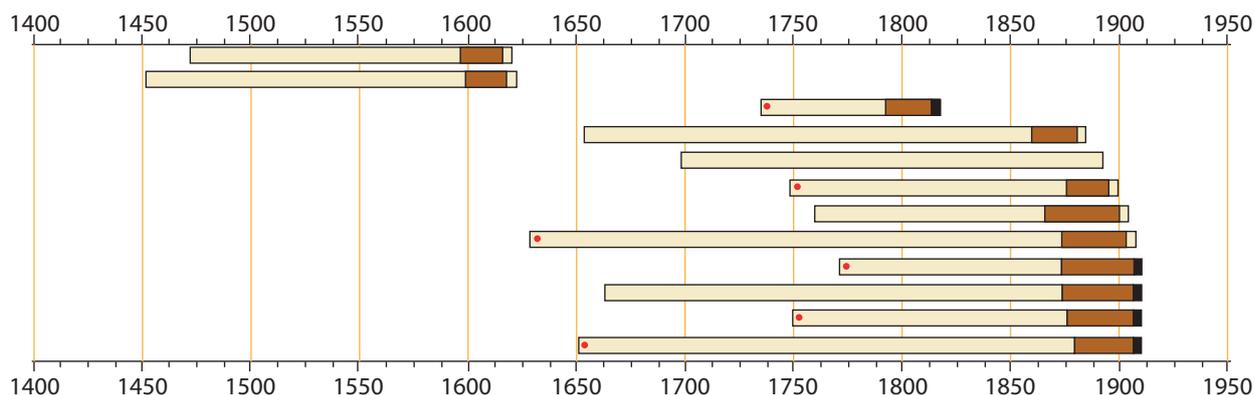


Figure 6 - Diagramme des chronologies des bois du chalet-grange Pra.
En beige, duramen ; marron, aubier ; noir, dernier cerne d'aubier ; point rouge, moelle.

significatif et visuel et justifie la distinction des deux chronologies.

Ainsi, 2 bois indiquent un abattage daté peu après 1623 : l'aubier est légèrement érodé, le dernier cerne ou peut-être quelques cernes manquent). Ces bois témoignent donc d'une activité de construction à l'emplacement du chalet pendant la 1^{ère} moitié du XVI^e siècle. 15 bois donnent des dates d'abattage au début du XX^e siècle avec 6 bois abattus en 1911 (aubier complet), attestant une activité de construction récente. L'analyse des empilages et d'autres pièces de la structure qui n'ont pas encore été échantillonnées, compléteraient cette histoire du bâtiment.

b - chalet Sestrière-1

Vingt rayons ont été mesurés donnant 9 séries individuelles (9 sections prélevées). Les deux séries les plus longues comportent 133 et 140 cernes et 4 séries ont plus de 80 cernes. Après synchronisation, une chronologie de 6 bois a été construite couvrant la période 1727-1912 (216 ans) ; 3 bois ne sont pas datés. Les 6 autres bois donnent des dates d'abattages, dans la première moitié du XIX^e siècle (après 1822-1828), à la fin du XIX^e (1894) et au début du XX^e siècle (1912) (Figure 7). L'analyse dendrochronologique de la grange attenante devrait apporter des informations historiques complémentaires.

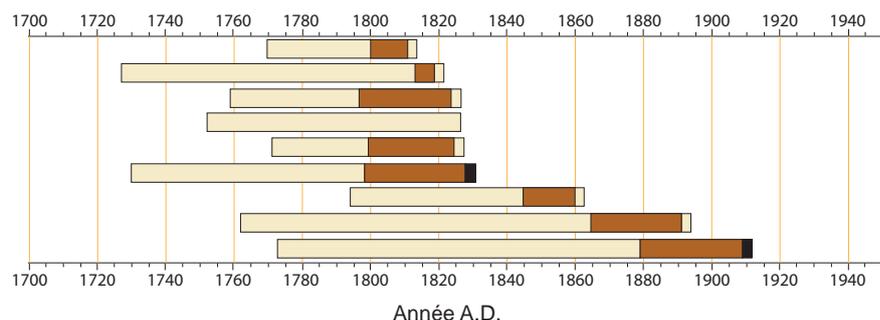


Figure 7 - Diagramme des chronologies des bois du chalet-grange Sestrière-1

c - chalet Sestrière-2

Nous avons mesuré 83 rayons, donnant 44 séries individuelles (44 sections prélevées). Les séries de cernes sont cependant assez courtes, mais suffisantes pour la datation, la série la plus longue comportant 127 cernes, et 33 séries ont plus de 80 cernes.

La synchronisation aboutit à la constitution de deux groupes principaux représentés par deux chronologies moyennes qui se chevauchent, et une chronologie isolée, toutes datées avec un niveau de confiance maximum : 1374-1547 (174 ans, 22 séries), 1667-1749 (83 ans, 1 série), 1714-1836 (123 ans, 18 séries) (Figure 8). 3 séries seulement (corrélés entre elles) ne sont pas encore datées.

Douze séries donnent des dates d'abattage (bois avec aubier complet) : 1493 (1), 1547 (1), 1749 (1) et 1836 (9).

Les dates de terminus (dernier cerne mesuré) des 29 bois dont l'aubier est incomplet se distribuent ainsi : 13 sont comprises entre 1450 et 1500, 7 entre 1500 et 1550, et 9 entre 1800 et 1836. Le nombre de cernes manquants serait à estimer, il varie de quelques cernes à 30 cernes voire plus. Cette variabilité est fonction de plusieurs paramètres liés aux arbres (croissance, c'est-à-dire largeur des cernes, âge de l'arbre, hauteur du prélèvement dans l'arbre) et aux techniques de charpente. Nous n'avons pas cherché ici à faire une estimation,

ayant à notre disposition pour notre propos un nombre suffisant de dates d'abattage.

L'ensemble des dates d'abattage, à l'année près et approchées, mettent en évidence trois périodes d'abattage principales, la première à la fin du XV^e s., ancrée autour de l'année 1493, et la deuxième au milieu du XVI^e s., ancrée autour de l'année 1547, et la troisième dans la première moitié du

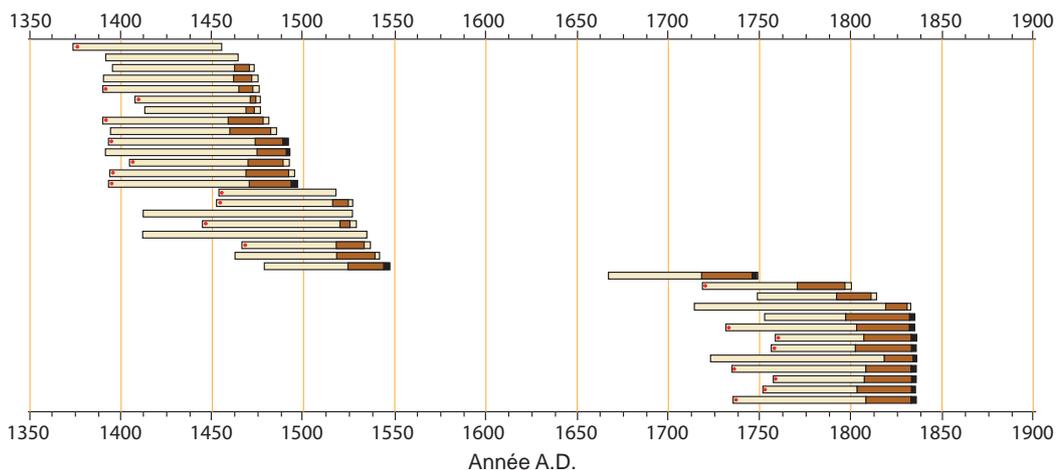


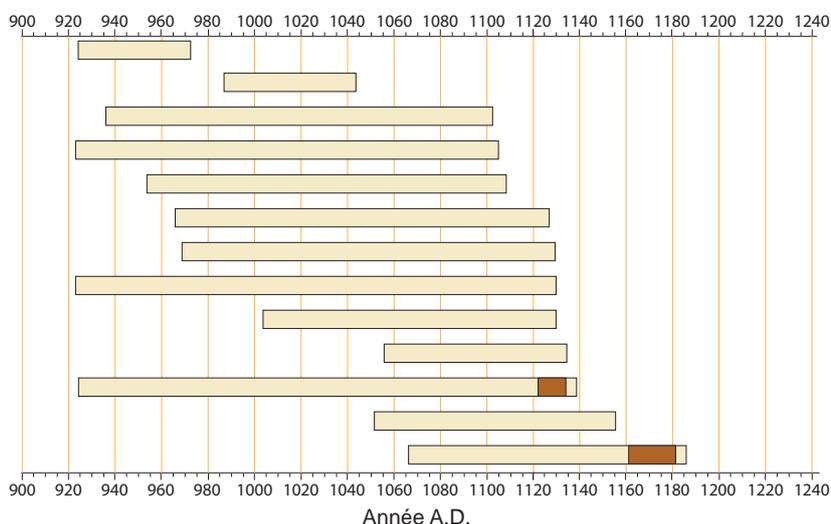
Figure 8 -
Diagramme des
chronologies des
bois du chalet-
grange Sestrière-2.

XIX^e siècle, ancrée sur l'année 1836. S'ajoute une date isolée (un bois) au milieu du XVIII^e siècle (1749). La construction initiale du chalet peut donc dater de la fin du XV^e siècle, et il aurait été restauré ou remanié 50 ans après. La date 1749 indique aussi soit une reconstruction de la grange à cette époque, soit une phase de réparation à une date inconnue avec un bois de remploi issu d'un arbre abattu à cette date. Les 9 pièces de bois abattus en 1836 associées aux dates comprises entre 1800 et 1836 (aubier incomplet) conduisent à reconnaître une phase importante de construction (ou de reconstruction) du chalet immédiatement après l'abattage de 1836. Il convient de faire deux remarques : premièrement il est possible que des dates soient sur-représentées car des pièces de bois peuvent provenir du même arbre ; deuxièmement les prélèvements n'ont pas été exhaustifs, il est donc possible, sinon probable, que d'autres bois du chalet donnent des dates d'abattage différentes de celles obtenues, traduisant une histoire du bâtiment plus complexe.

d - Chapelle St Romain (Puy-Saint-Vincent)

Vingt et un rayons ont été mesurés, donnant 21 séries individuelles (21 sections prélevées). Les séries ont de 18 à 216 cernes, 12 ayant plus de 70 cernes. Deux échantillons seulement ont de l'aubier. Après synchronisation, 3 groupes sont identifiés, qui donnent 3 chronologies, une de 264 cernes (13 séries), une deuxième de 85 cernes (7 séries) et une troisième de 66 cernes (une série). Seule la chronologie de 264 cernes a pu être datée : 923-1186 (Figure 9), sur la référence de Névache constituée de bois de construction (Edouard,

Figure 9 - Diagramme des
chronologies des bois du clocher
de la Chapelle Saint Romain.



2010).

La date 1186 est celle du dernier cerne d'aubier de l'arbre, sa date d'abattage et, par voie de conséquence, 1186 est une année d'activité de construction. Cette date est à rapprocher de l'évocation de la chapelle Saint Romain dans le cartulaire d'Oulx en 1183 sous le vocable de « *Sanctus Romanus de Podio* » (Dartevelle, 1990). De la chapelle, il est aussi dit « *qu'il ne reste qu'un petit monument ... établi probablement sur le site même d'un édifice plus ancien déjà en place en tout cas au XIV^e siècle* » (Dartevelle, 1990). Or le coffrage a été décrit au moment de la restauration comme imbriqué avec l'assemblage de pierre et serait donc d'origine, même s'il y a un décalage de 3 ans avec la date du cartulaire. Le clocher apparaît comme étant une partie conservée du monument d'origine. L'hypothèse d'une flèche de clocher plus récente avec remploi de planches est très peu probable. Quoiqu'il en soit, les planches proviennent d'un arbre abattu avant 1200.

3 - Synthèse chronologique

Les 77 nouvelles séries datées (95 bois prélevés) portent notre ensemble de données dendrochronolo-

giques issues des constructions à 370 bois datés. Ces chronologies couvrent deux périodes (période 1 = 751-1303, période 2 = 1357-1912, entre 751 et 1912, séparées par un hiatus au milieu du Moyen Âge, entre 1303 et 1357. La Figure 10 montre que les dates terminus (dernier cerne d'aubier ou non) sont très nombreuses pendant le Moyen Âge (XI^e et XII^e siècles) et pendant les périodes moderne (XVI^e, XVII^e et XVIII^e siècles) et contemporaine (XIX^e siècle) alors qu'elles sont très peu nombreuses à la fin du Moyen Âge (XIII^e, XIV^e et XV^e siècles). Le hiatus de 54 ans, situé dans la première moitié du XIV^e siècle, subsiste malgré ces nouvelles chronologies obtenues sur des bâtiments potentiellement anciens.

Les hypothèses suivantes, proposées dans Edouard 2010, pour expliquer ces fluctuations dans la réparti-

tion chronologique des bois sont encore à vérifier :

- aléas de l'échantillonnage ;
- changements du contexte économique et social : une période favorable d'activité économique caractérisée par un essor démographique avec fort prélèvement de bois et pastoralisme jusqu'à la fin du XIII^e siècle, puis une période de faible activité économique marquée par un effondrement démographique pendant les XIII^e siècle et une partie du XIV^e siècle, en relation avec des conflits militaires et/ou des épidémies (Falque-Vert, 1997 ; Jourdain-Annequin, 2004), accompagnés d'un arrêt des constructions donc des abattages de bois, la reprise démographique, avec une reprise d'activité, se faisant progressivement au cours des siècles suivants (Guichonnet, 1980), entraînant de nouvelles phases d'abattage.

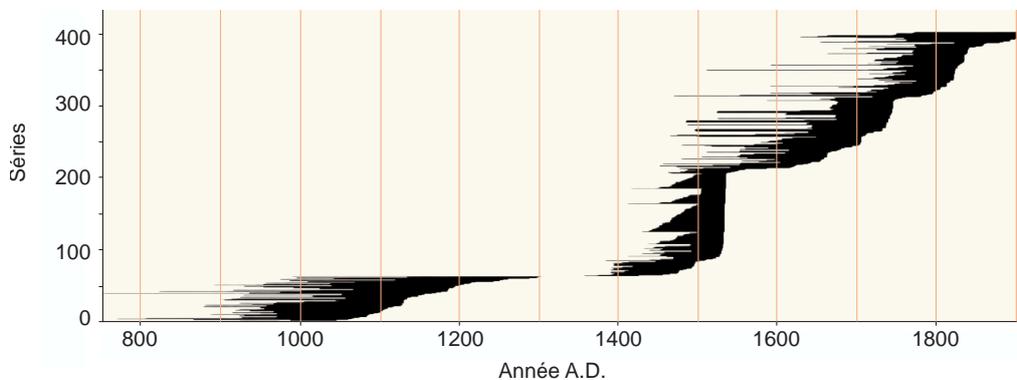


Figure 10 -
Diagramme des
chronologies des
370 bois étudiées
du Briançonnais et
Mercantour.

CONCLUSION

La datation de bois de bâtiments traditionnels supplémentaires met en évidence l'existence de témoins bien en place de l'implantation humaine à la fin du XII^e siècle sur les lieux d'occupation contemporains dans des vallées alpines différentes même peu éloignées (Vallouise-Ecrins et Clarée-Briançonnais), et des témoins plus récents aux époques modernes et contemporaines dans l'ensemble des Alpes du Sud. Ces nouveaux résultats montrent que l'habitat traditionnel conserve des témoins importants de l'habitat médiéval, par le grand nombre de pièces de bois maîtresses, dans un matériau considéré comme périssable,

si l'on pense aux incendies de bâtiments relatés dans les chroniques locales (Arnaud, 1983). Le patrimoine bâti traditionnel des Alpes du Sud, modeste par ses dimensions, s'avère bien être un patrimoine d'une grande profondeur historique dont la connaissance est encore très faible au moins en terme chronologique. La révéler par l'approche dendrochronologique contribue aussi à l'analyse des fluctuations de l'activité humaine en mettant en évidence la dynamique historique du bâti traditionnel dans ces régions de haute montagne alpine comme cela est observé dans d'autres régions reculées (Bernard, 1997 ; Fraiture, 2009 ; Houbrechts, 2005).

Remerciements

Cette étude a été soutenue par l'IMEP-UMR 6116, le CCJ-UMR 6573 et le programme VMC, projet ANR-06-VULN-010, ESCARSEL). Je remercie tout particulièrement les propriétaires des bâtiments étudiés pour leur accueil et les autorisations de prélèvements (MM. Chemin et Isseautier, M. le maire de Puy-Saint-Vincent et M. Garin, architecte du Patrimoine).

BIBLIOGRAPHIE

- ARNAUD C., 1983. Une mémoire de Saint Véran. *Le Monde Alpin et Rhodanien*, 3, 101 p.
- BELINGARD C., 1996. Etude dendroécologique de la dynamique de la limite supérieure de la forêt dans les Alpes du Sud, en relation avec les facteurs climatique et anthropique. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille III, 103 p.
- BERNARD V., 1997. Bois archéologiques, dendrochronologie et problématique du couvert forestier dans le Bassin Parisien entre le Mésolithique et le haut Moyen Age. Thèse de doctorat, Besançon, Université de Franche-Comté, faculté des sciences et techniques, 248 p.
- DARTEVELLE G., 1990. Eglises médiévales des Hautes-Alpes. « Plein-Cintre » Editions, 119 p.
- EDOUARD J.-L., 2008. Données nouvelles sur l'histoire de la Chapelle Saint Hippolyte (Névache, Hautes-Alpes, France). Apport de la datation dendrochronologique. *Revue de la Société d'Etude des Hautes-Alpes*, 37-52.
- EDOUARD J.-L., 2008. Cernes d'arbres et chronologies holocènes dans les Alpes françaises. In Du climat à l'homme - Dynamique holocène de l'Environnement dans le Jura et les Alpes, Actes du Colloque GDR JURALP, Aix-en-Provence, 15-16 novembre 2007. Collection EDYTEM, 6, 179-190.
- EDOUARD J.-L., 2010. Longue chronologie de cernes du mélèze et occupation humaine depuis plus de mille ans dans la vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes françaises). Actes du Colloque « Archéologie de la montagne européenne, Musée - museum départemental de Gap (Hautes-Alpes), 29-30 septembre 2008. Collection Bibliothèque d'Archéologie Méditerranéenne et Africaine. Edition Centre Camille Julian et Errance, 319-327.
- FALQUE-VERT H., 1997. Les hommes et la montagne en Dauphiné au XIII^e siècle, Grenoble, 1997, Presses Universitaires, 517 p.
- FRAITURE P., 2009. Contribution of dendrochronology to understanding of wood procurement sources for panel paintings in the former Southern Netherlands from 1450 AD to 1650 AD. In Symposium EuroDendro 2008: The long history of wood utilization. *Dendrochronologia*, 27, 2, 95-111.
- GUICHONNET P. (dir.), 1980. Histoire et civilisation des Alpes. Tome 2 : destin humain, Ed. Privat/Payot, 1980, 415 p.
- HOFFSUMMER P., 2002. Les charpentes du XI^e au XIX^e siècle, Typologie et évolution en France du Nord et en Belgique. Monum, Edition du patrimoine, 376 p.
- HOUBRECHTS D., 2005. Le logis en pan-de-bois à Liège et dans le bassin de la Meuse moyenne (1450-1650) : approches archéologique et dendrochronologique. Dissertation, 2 vol. Université de Liège, Belgique.
- JOURDAIN-ANNEQUIN C. (dir.), 2004. Atlas culturel des Alpes occidentales. De la Préhistoire à la fin du Moyen Âge. Picard, 438 p.
- KAENEL M., SCHWEINGRUBER F.-H., 1996 : Multilingual glossary of dendrochronology. Bern, WSL/FNP (Swiss Federal Institute for Forest), 467 p.
- LAMBERT G.-N., 1998 La Dendrochronologie, mémoire de l'arbre. In : FERDIERE (A.) dir. La datation en laboratoire. Coll. « Archéologiques », éd. Errance, 13-69.
- LAMBERT G.-N., MILLOTTE J.-P., VUAILLAT D., 2000. Le Musée de Cabrerets et le Premier Age du Fer dans le département du Lot. Aspects de l'Age du Fer dans le Sud du Massif Central. In Actes du XXI^e coll. international de l'AFEAF. Conques-Montrozier, 8-11 mai 1997. Thème régional. Monographies d'Archéologie Méditerranéenne 6-2000, Lattes ; 81-104.
- LAMBERT G.-N., 2006. Dendrochronologie, Histoire et Archéologie, modélisation du temps. Le logiciel Dendron II et le projet Historic Oaks. Habilitation à diriger des recherches, Université de Franche-Comté, Besançon, 2 vol., 152 p. et 206 p.
- MALLE M.-P., 1999. L'habitat du nord des Hautes-Alpes. Patrimoine architectural et mobilier. Association pour le Patrimoine de Provence et la Société d'études des Hautes-Alpes, 437 p.
- RINN F., 1996. TSAP Reference Manual. Version 3.0.
- SCHWEINGRUBER F.-H., 1988. Tree-rings - Basics and applications of dendrochronology, Dordrecht, Kluwer, 277 p.
- SCHWEINGRUBER F.-H., 1990. Anatomy of European woods, WSL/FNP, Haupt, 800 p.
- SERRE F., 1979. The dendroclimatological value of European larch (*Larix Decidua* Mill.) in the French Maritime Alps. *Tree-Ring Bulletin*, 38, 25-34.
- TESSIER L., 1986. Chronologie de mélèzes des Alpes et Petit Age Glaciaire. *Dendrochronologia*, 4, 97-113.

Hétéroconnexions de courtes séries dendrochronologiques et tracéologie Le cas des bois de pêcheries du début de l'Âge du Bronze en baie du Mont-Saint-Michel (Manche)

BERNARD V.¹, BILLARD C.²,
JAOUEN G.³, SANDS R.⁴

¹ Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences,
Histoire (CReAAH), CNRS, Rennes.

² DRAC-SRA Basse-Normandie, Caen.

³ Université Paris I, Paris.

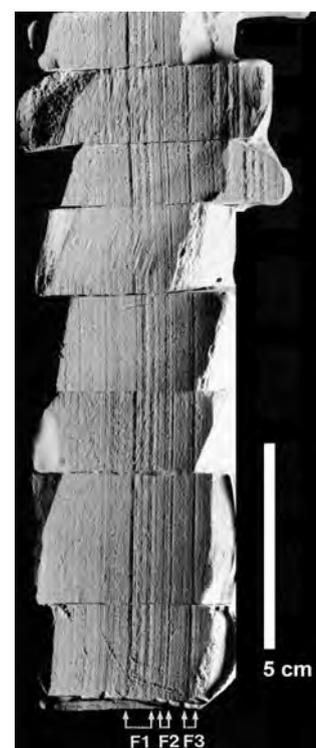
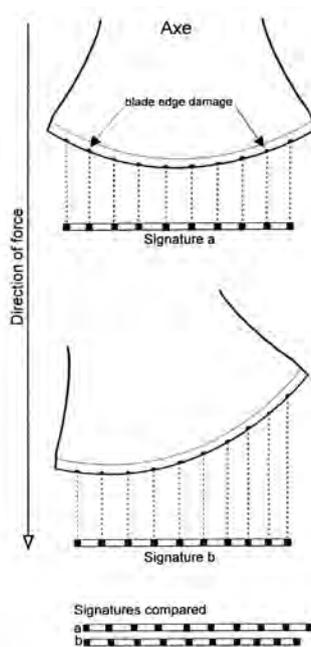
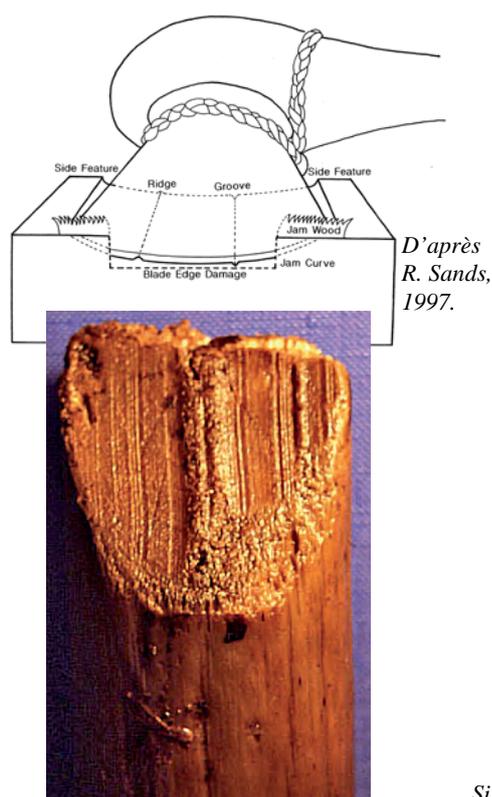
⁴ IT UCD, School of Archaeology, Dublin, Irlande.

Contact : vincent.bernard@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ

Découvertes en 1970 et situées dans la zone nord-orientale de la Baie du Mont-Saint-Michel, les pêcheries de Saint-Jean-le-Thomas ont donné lieu à une étude archéologique approfondie depuis 2002. Les vestiges se répartissent en deux sites proches géographiquement et chronologiquement (vers 2100-1900 cal BC), l'un complexe et vaste, celui de la plage de Pignochet, l'autre plus simple et plus restreint, celui de la plage Saint-Michel. Si les structures de barrages en bois ont été remarquablement conservées grâce à un environnement estuarien peu exposé, leur mise au jour s'effectue aujourd'hui dans un contexte de très forte érosion littorale.

L'ensemble de ces structures est pour nous l'occasion de réfléchir sur les stratégies développées autour de la construction et de l'entretien de telles structures à la transition du Néolithique et de l'âge du Bronze en croisant les données archéologiques et environnementales, ainsi que les données chronologiques et techniques obtenues à partir de l'étude des matériaux ligneux. Dans ce dessin, nous avons tenté de mettre à profit, grâce à une étude la plus exhaustive possible, l'ensemble des informations conservées par les bois de construction de la pêcherie de la plage Saint-Michel, la plus petite et donc la plus à même de nous permettre de tester une approche dendrochronologique et tracéologique conjointe. La diversité taxonomique (7 essences différentes) et le faible nombre de cernes (<50) rencontrés parmi les bois de cette structure ont pour l'instant limité l'approche dendrochronologique à l'établissement d'une chronologie relative des principales phases de construction. Or, les problèmes anatomiques rencontrés chez le noisetier, qui constitue pourtant l'une des principales essences sélectionnées par l'homme, nous ont obligé à trouver le moyen de vérifier si le dernier cerne observé sous l'écorce correspond réellement au dernier formé par l'arbuste avant son abattage. En effet, de fréquents cernes manquants perturbent notre compréhension globale de l'évolution de la pêcherie, et ce sont donc les signatures laissées par le tranchant des haches employées il y a 4000 ans qui nous permettent d'appréhender le rythme de construction du site.



Signatures d'outils en fonction des défauts de la lame. Photos V. Bernard.

Dendrochronologie et archéologie de supports en bois de peintures flamandes Apports et méthodologie

FRAITURE P.

*Institut Royal du Patrimoine Artistique,
Cellule de dendrochronologie, Bruxelles, Belgique.*

Contact : pascale.fraiture@kikirpa.be

RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, l'Université de Liège et l'Institut Royal du Patrimoine Artistique à Bruxelles mènent des recherches dendrochronologiques et archéologiques sur les supports de peintures en bois, principalement produits entre 1450 à 1650 dans les anciens Pays-Bas méridionaux (approximativement la Belgique actuelle). Celles-ci ont le double objectif de mettre en évidence les évolutions des techniques de mise en œuvre du bois et de dégager les critères de sélection du matériau pour la fabrication des panneaux peints. Les raisons à l'origine de ces évolutions ne peuvent se comprendre que par rapport à un cadre de production plus large, en relation notamment avec le contexte politique, économique et religieux. Premièrement, les relations politiques internationales ont joué un rôle déterminant dans la question de l'approvisionnement en bois. Or celle-ci

est au centre de notre problématique puisque, à l'époque qui nous occupe, le nord de la Belgique actuelle est déjà en grande partie déboisé. Les centres de production de peintures ont donc dû importer le chêne dont ils avaient besoin. En deuxième lieu, la période étudiée couvre le passage du Moyen Âge à la Renaissance, époque de grandes mutations en Europe, tant aux points de vue artistique et socio-économique, que scientifique. Enfin, au début du XVI^e siècle, les artistes évoluent dans le nouveau contexte de production du marché libre. Désormais, ce n'est plus le client qui passe commande, mais les ateliers qui produisent des œuvres de leur propre initiative et les vendent dans les foires ou sur les marchés. Il s'avérerait donc utile d'étudier les moyens mis en œuvre par les artisans du bois pour répondre à une demande sans cesse croissante de la population. À côté de ces constatations d'ordre contextuel, et plus concrètement, le matériel d'étude a nécessité le développement d'une méthodologie propre à l'examen dendrochronologique des panneaux peints. Les résultats enregistrés et discutés tout au long de ces recherches ont permis d'éclairer les apports et les limites de l'application de cette discipline à des objets tels que les supports de peinture. Ils ont également mené à la constitution d'un nouveau référentiel dendrochronologique adapté à la datation de peintures sur bois des anciens Pays-Bas.



La tableau à étudier.



La tranche du tableau.



La tranche avant préparation.

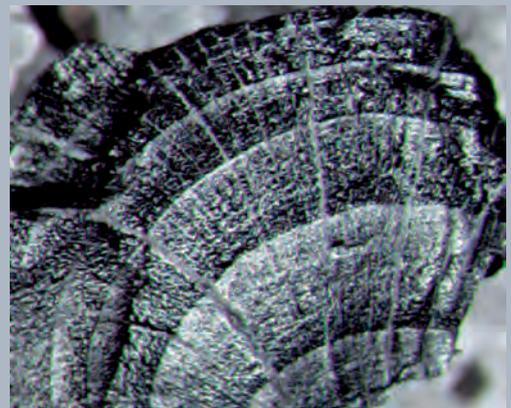


La tranche après préparation.



*Acquisition des données.
Photos P. Fraiture.*

Méthodes



Au recto :

En haut : coupe transversale d'un charbon de hêtre (photo S. Paradis-Grenouillet).

En bas : échantillons et outillage léger de terrain (photo G.N. Lambert).

L'UTILISATION DE LA RÉSISTOGRAPHIE EN DENDROGÉOMORPHOLOGIE RETOUR D'EXPERIENCES

USE OF RESISTOGRAPH IN DENDROGEOMORPHOLOGY FEEDBACK

JÉROME LOPEZ SAEZ¹, CHRISTOPHE CORONA¹, FRÉDÉRIC BERGER¹, MARKUS STOFFEL²

¹ Cemagref UR EMGR, 2 rue de la Papeterie, B.P. 76, F 38402 Saint Martin-d'Hères cedex.

² Laboratory of Dendrogeomorphology, Institute of Geological Sciences,
University of Berne, Baltzerstrasse 1 + 3, CH 3012 Berne.

Contact: jerome.lopez@cemagref.fr

RÉSUMÉ

Le résistographe convertit en densité relative la résistance au forage d'une aiguille. Il a été testé pour tenter de mettre en évidence une réponse densitométrique particulière des cernes diagnostics utilisés en dendrogeomorphologie. Des mesures micrométriques traditionnelles et des forages résistographiques ont été réalisés sur quinze rondelles de mélèzes, impactées ou non, issues d'un dépôt avalancheux. Les paramètres de densité et de largeur de 613 cernes délimités sur les profils résistographiques ont été calculés. La matrice obtenue a été traitée au moyen d'une analyse en composantes principales qui fait ressortir la densité anormalement élevée des bois de réaction ou de compression et des tissus calleux de cicatrisation. La grille de lecture simplifiée issue de l'ACP fournit des critères d'identification probabilistes des perturbations au sein d'un signal densitométrique. L'utilisation conjointe du résistographe et de cette grille offre des perspectives en matière de spatialisation de l'enveloppe avalancheuse et de cartographie de l'aléa.

MOTS-CLÉS : RÉSISTOGRAPHE, MICROMÉTRIE, DENDROGÉOMORPHOLOGIE, DENSITÉ, AVALANCHES.

ABSTRACT

*The resistograph device measures the drill resistance of a fine needle as it penetrates wood. It was investigated for rapid assessment of relative wood density of particular tree-rings used in dendrogeomorphology. Ring width and resistographic measurements were performed on 15 disc stems (cross sections) of *Larix decidua* from an avalanche talus. 11 stems showed visible signs of past avalanches impacts; 4, no obvious avalanche damage. Resistographic profiles were processed to determine width and density parameters of 613 tree rings. The data set, simplified using a Principal Component Analysis, highlights the abnormal density of reaction wood, compression wood and overgrowing callous tissue. The simplified assessment grid coming from PCA provides probability benchmarks to identify disturbances in a densitometric signal. The combined use of grid and resistograph offer prospects for spatialization and cartography of avalanches hazards.*

KEYWORDS: RESISTOGRAPH, RINGWIDTH MEASUREMENT, DENDROGEOMORPHOLOGY, DENSITY, AVALANCHES.

INTRODUCTION

La dendrochronologie repose sur l'analyse des cernes considérés comme des enregistrements des variations de croissance de l'arbre en condition naturelle. Le cerne est l'anneau de bois produit par le cambium au cours d'une année de végétation. Pour les résineux, le cerne est composé de bois initial clair et de bois final foncé. Le bois initial est formé de grandes cellules à parois minces, lui conférant une faible densité et une couleur claire. Le bois final est composé de cellules à parois épaisses, généralement plus petites, qui lui donnent une densité supérieure et une couleur

foncée (Figure 1). Le comptage des cernes donne de façon objective et précise l'âge d'un échantillon d'individus. La mesure des cernes permet de comparer la production d'un individu à un autre.

La dendrogéomorphologie, subdivision de la dendrochronologie, a été développée dans les années 70 (Alestalo, 1971). Elle fournit des méthodes pour reconstituer des événements géomorphologiques passés tels que les avalanches (Rayback, 1998), les laves torrentielles (Stoffel *et al.*, 2005), les glissements de terrain (Stefanini, 2004), les mouvements de

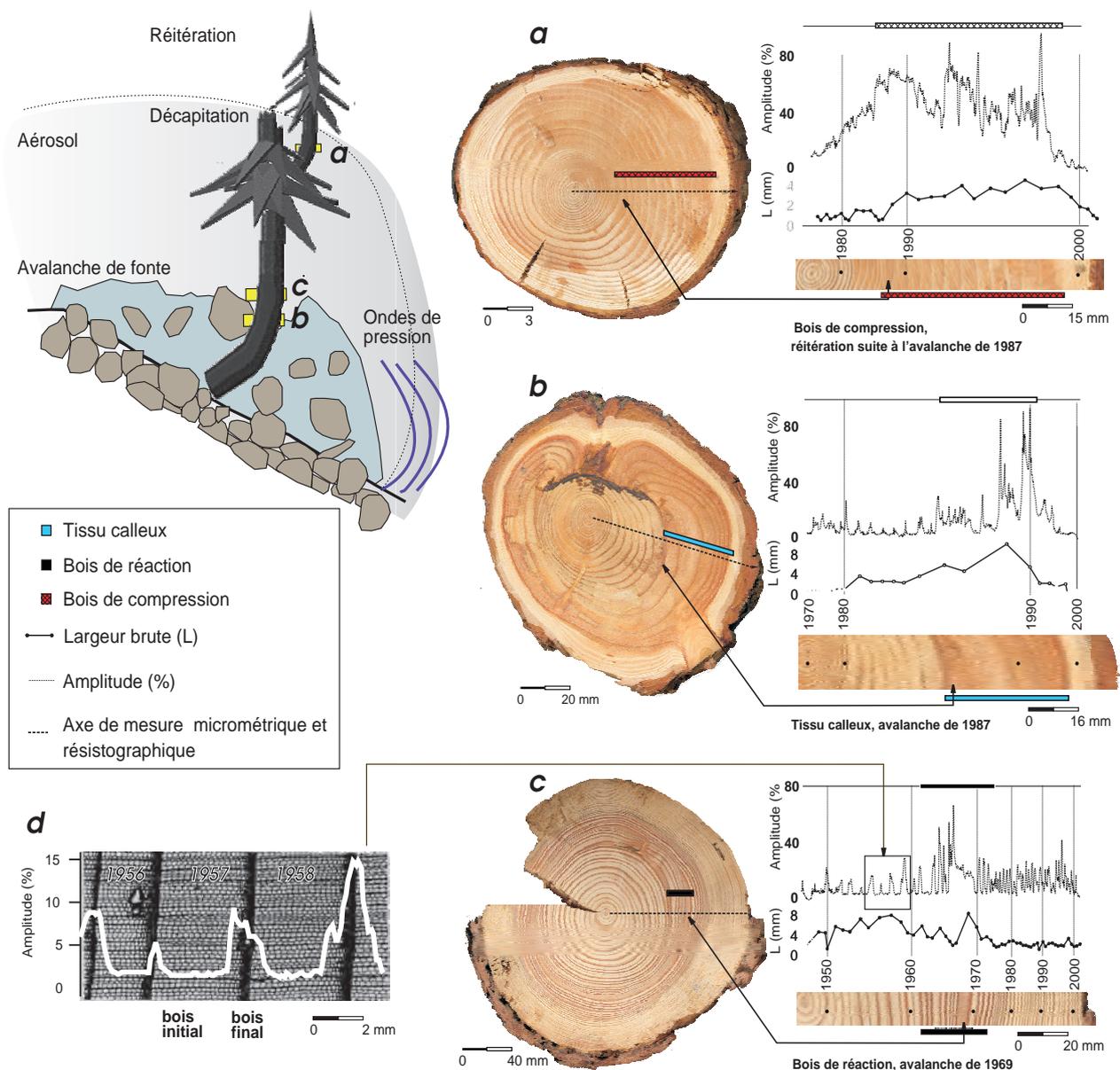


Figure 1 - Variation de la largeur et de la résistance au forage de différents types de bois :
 a) bois de compression sur réitération après décapitation ;
 b) tissu calleux de cicatrisation ;
 c) bois de réaction formé suite à un impact ;
 d) alternance de bois initial et de bois final dans un cerne sain.

glaciers (Bachrach *et al.*, 2004) et les chutes de blocs (Stoffel, 2006). Elle repose sur l'identification de perturbations de croissance – cicatrices, rejets, étêtage – à l'origine de la formation de cernes diagnostics de densité anormale (Figure 1). La présence de bois, jaune ou brun rouge, à cellules denses et à cloisons épaisses, appelé bois de réaction, est, par exemple, révélatrice d'un impact. L'existence d'un bourrelet constitué de tissu calleux à forte densité traduit la cicatrisation de la zone cambiale suite à une blessure (Stoffel, 2006).

Traditionnellement, l'identification de ces cernes est simplement visuelle, par lecture directe sur les échantillons prélevés. La lourdeur des méthodes de mesure de la densité en laboratoire, méthode volumétrique ou microdensitométrique à rayons X (Cown et Clement, 1983) est incompatible avec une étude dendrogéomorphologique dont la représentativité spatio-temporelle

repose, en général, sur plusieurs centaines de prélèvements (Stoffel *et al.*, 2005). Des instruments de terrain non destructifs tels que le torsiomètre (Polge et Keller, 1970) ou le pénétromètre de type Pilodyn (Sprague *et al.*, 1983) existent. Ils ne permettent cependant qu'une mesure relative, très localisée, limitée aux cernes périphériques et connaissent des dérives liées, notamment, à l'épaisseur variable de l'écorce. Le résistographe (Rinn *et al.*, 1996) offre une méthode alternative. Conçu pour l'expertise phytosanitaire préventive afin de détecter *in situ* la présence d'altérations ou de cavités, de densités faibles à nulles, au niveau d'arbres sur pied ou de bois de construction, il traduit les variations de résistance de forage d'une aiguille en valeur de densité. Nous l'avons testé à des fins dendrogéomorphologiques pour tenter de mettre en évidence une réponse densitométrique particulière des cernes diagnostics.

I - MATÉRIEL ET METHODES

Les prélèvements utilisés sont issus d'une étude dendrogéomorphologique réalisée au cours de l'été 2004 sur le dépôt d'avalanches Pierres Jean Jeanne (massif de l'Oisans, Alpes du Nord, France). De forme conique, d'une longueur de 800 m, d'une surface de 49 ha et d'un dénivelé de 400 m (1300-1700 m), ce dépôt est dominée par une corniche de 500 m de gneiss indifférenciés constituant l'assise du massif de la Meije au sud de Villar d'Arène. Il a été retenu pour plusieurs raisons :

- un fonctionnement avalancheux dominant avéré par la mise en évidence de la segmentation des profils de pente et du granoclasement longitudinal caractéristique (Francou et Manté, 1990) ;
- la présence de mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.) de morphologies variées, portant les traces d'impacts utilisables pour une reconstitution d'une chronique avalancheuse ;
- une documentation historique satisfaisante (Enquête Permanente sur les Avalanches – EPA – seulement depuis 1970).

Au total, 234 arbres ont été échantillonnés. Les arbres les plus gros ont été sondés à la tarière de Pressler, à une hauteur moyenne de 100 cm, perpendiculairement à la courbe de niveau ; 170 rondelles ont été prélevées sur les arbres morts ou impactés dont l'avenir était compromis et/ou ne présentant plus de qualité sylvicole. Les échantillons ont été soigneusement poncés en laboratoire. L'examen visuel des cicatrices et du bois de réaction a permis de déterminer avec certitude 13 années avalancheuses pour lesquelles le nombre d'impacts est élevé : 1914, 1922, 1924, 1927, 1940, 1943, 1953, 1955, 1969, 1974, 1981, 1988, 1994 (Corona, 2007). Quinze rondelles issues de cette campagne de prélèvements ont fait l'objet de mesures résistogra-

phiques (Figure 2). Cinq rondelles présentent, suite à un impact avalancheux, des séquences de bois de réaction d'une durée de deux à cinq ans (50 cernes au total). Trois, prélevées sur des rejets de croissance consécutifs à une décapitation, sont constituées essentiellement de bois de compression (67 cernes). Trois sont caractérisées par la présence d'un bourrelet de cicatrisation (16 cernes). Quatre échantillons témoins ne présentent aucune perturbation. Au total, 613 cernes ont été mesurés au moyen d'un micromètre électronique de type Lintab montée sous une loupe binoculaire reliée à un ordinateur (précision 1/100 mm). Afin de comparer les patrons de croissance des arbres entre eux, les séries de largeurs brutes de chacun des échantillons ont été linéarisées à l'aide de modèles de régression linéaire, quadratique ou cubique.

Les largeurs des cernes sont alors transformées en indices I_c (largeur mesurée/largeur prévue par le modèle de régression) (Astrade *et al.*, 1998). L'interdatation, qui consiste à attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa formation, a été réalisée grâce à la méthode des cernes caractéristiques. Les cernes étroits de 1962, 1972, 1983, 1986 et les cernes larges de 1955, 1981, 1988 et 1993 de la chronologie de référence, établie sur le dépôt avalancheux, à partir d'arbres sains (Corona, 2007) ont été utilisés comme cernes diagnostics. Le cerne le plus ancien de l'échantillon date de 1943, celui du plus jeune de 1987 (figure 2).

Le profil résistographique de chacune des rondelles a été mesuré selon un axe identique à celui de la micrométrie à l'aide d'un résistographe (Rinn *et al.*, 1996) de type « IML Resi F400 ». L'instrument est composé d'une unité de forage et d'un module de stockage (Figure 3). Une aiguille de 1,5 à 3 millimètres de diamètre est introduite à vitesse constante dans le bois. La

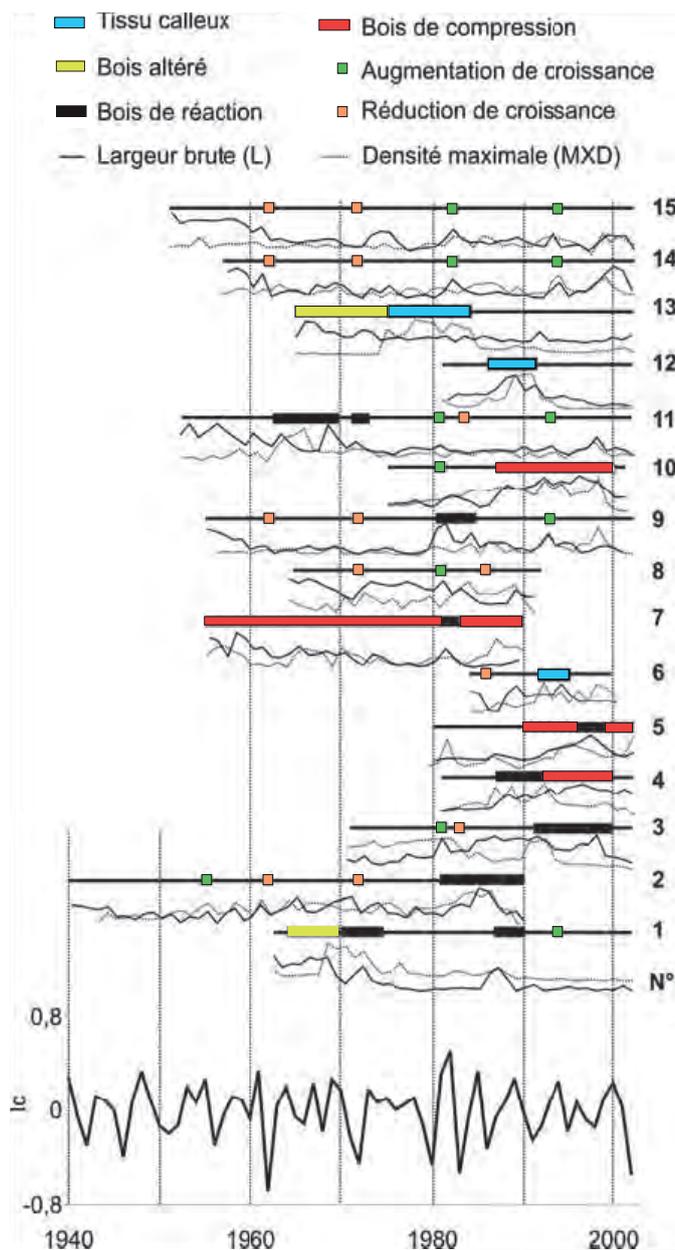


Figure 2 - Types de bois, variation de l'indice de largeur (Ic) et de la densité des cernes de 15 mélèzes (*Larix decidua* Mill.) sur dépôt avalancheux.

consommation de l'unité de forage et l'amplitude de la résistance au forage sont mesurées électroniquement tous les dixièmes de millimètres et converties en densité relative. Les variations de densité intra et inter-annuelles sont affichées à l'échelle 1:1 sur une bande de papier cirée au moyen d'un stylet pour une lecture directe. Elles sont également stockées sous forme numérique dans le module électronique et peuvent être traitées au moyen du logiciel FTools (Instrumenta Mechanik Labor GmbH).

Pour atteindre l'objectif fixé, il convient de délimiter chaque cerne sur le profil résistographique et de lui attribuer les paramètres de densité qui lui correspondent. Cette délimitation a été réalisée au moyen de FTools. Afin de détecter des erreurs ponctuelles de comptage, un coefficient de corrélation, r de Pearson, a été calculé entre les séries individuelles de largeur de cernes issues de l'analyse micrométrique et celles issues de la mesure résistographique. La significativité de ce coefficient a été testée au moyen du test de Bravais Pearson avec un risque d'erreur (α) fixé à 5%.

La largeur (L en mm), la densité maximale (MXD en %) et la variance intra-cerne (VARD), qui intègre conjointement l'amplitude et la dispersion des valeurs de densité intra-cerne, ont ensuite été déterminées pour chaque cerne. Afin de faire ressortir les cernes de largeur anormale, les séries individuelles brutes de largeurs de cernes ont également été standardisées, en indices de croissance, en enlevant les variations de basses et moyennes fréquence au moyen d'une moyenne mobile pondérée d'ordre 3 (MMP3 en %) (Petitcolas, 1998).

La matrice de données obtenue a été traitée au moyen d'une analyse multifactorielle en composantes principales (ACP). Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur les coordonnées des individus projetées sur les composantes principales F1 et F2. Basée sur le critère d'agrégation de Ward, qui minimise la perte d'inertie entre deux étapes, cette classification permet d'établir une typologie des cernes en fonction des variables choisies. Une grille de lecture simplifiée du signal densitométrique, est obtenue à partir des ellipses à 80% de confiance de chacune des classes identifiées. Basée sur la largeur et la densité maximale, elle permet une identification probabiliste des perturbations au sein de ce signal.



Figure 3 - Unité de forage du résistographe "IML Resi F400".

II - RÉSULTATS

Les rondelles sans perturbation ont un signal résistographique régulier sur lequel chaque cerne est identifiable. Le coefficient de corrélation (r) entre la série de largeur de cernes mesurée au moyen du micromètre et celle extrapolée du signal densitométrique atteint, en moyenne, 0,85 (de 0,71 à 0,96) pour les quatre échantillons témoins (n°8, 9, 14, 15). Ces valeurs sont statistiquement significatives au seuil $\alpha=0,05$ même si le nombre de cernes est systématiquement sous-estimé (Figure 4). Ce paradoxe s'explique par la position des cernes omis situés aux extrémités de la série, à proximité de l'écorce ou de la moelle. De nombreuses omissions dans la détection des cernes pour huit des onze échantillons perturbés conduisent à une corrélation faible non significative sur le plan statistique entre les séries. Afin de pallier cette difficulté, pour ces huit rondelles, les cernes ont été repositionnés sur le signal résistographique en utilisant les largeurs issues de la micrométrie.

Le plan factoriel décrit par les composantes principales F1 et F2 de l'ACP explique 78,4% de la variance totale de l'échantillon (Figure 5). Les variables relatives à la densité, variance intra-cerne et MXD, contribuent positivement à F1, à hauteur respective de 34,65 et 32,7%. Les largeurs de cernes, brutes ou standardisées par une moyenne mobile d'ordre 3 (MMP3), expliquent 36,1 et 31,4% de la variance contenue dans F2. Le dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique agrège les individus en 6 classes, au niveau de la troncature 35, nommées C1 à C6. Sur le plan anatomique, C1, C2, C3, agrègent essentiellement des cernes sains caractérisés par une densité maximale faible

(médiane inférieure à 20%) et une variance intra-cerne quasi nulle. La distinction inter-classes repose sur l'indice de croissance et la largeur de cernes. Quinze cernes larges (médiane supérieure à 6 mm) et d'indice de croissance fort (MMP3 médiane >180%), constituent C1. Trois sont datés de 1981, trois de 1988, deux de 1993. Ces années de forte augmentation de croissance sont les repères chronologiques utilisés pour l'interdatation. Elles correspondent à des conditions climatiques favorables. Au cours de l'année précédant l'année de formation du cerne (n-1), les étés frais et humides sont suivis d'automne chauds et arrosés au cours de l'année précédent l'année de formation du cerne (n-1). Au cours de l'année de formation du cerne (n), les hivers et les printemps sont humides (Corona, 2007). Les classes 2 et 3 sont composées respectivement de 91 et 340 cernes, dont plus de 80% de cernes sains, de MMP3 inférieure à 125% et d'une largeur médiane de 1 mm (C3) à 3 mm (C2). Trente trois cernes diagnostics, ont cependant été associés à C2, 8 sont constitués de bois de réaction, 6 de bois altéré et 19 de bois de compression. Sur un total de 34 cernes diagnostics adjoints à C3, 20 correspondent à du bois de compression, 7 à du bois de réaction, 4 à du bois altéré et trois à du tissu calleux. Sur le plan anatomique, C4, C5 et C6 sont constitués de 56 cernes indicateurs d'une perturbation sur un total de 77. Ces trois classes se distinguent des précédentes par une MXD élevée (MXD médiane >40%) et une VARD importante (VARD médiane >100). C4 se différencie nettement de C5 et C6 par sa densité maximale (MXD médiane >90%) et sa variance (VARD médiane >300). Treize individus, dont six constitués de bois de réaction

| N° | Nombre de cernes | | Ecart (N2 - N1) | Coefficient de corrélation R (Pearson) | p value Pearson (95%) | Perturbations anatomiques |
|----|------------------|---------------------|-----------------|--|-----------------------|---------------------------|
| | Micrométrie (N1) | Résistographie (N2) | | | | |
| 1 | 41 | 37 | -4 | 0,67 | <0,0001 | réaction |
| 2 | 48 | 40 | -8 | -0,08 | 0,572 | réaction |
| 3 | 35 | 23 | -12 | 0,12 | 0,586 | réaction |
| 4 | 24 | | | Signal bruité | | réaction |
| 5 | 30 | 24 | -6 | 0,88 | <0,0001 | compression |
| 6 | 17 | 11 | -6 | 0,08 | 0,512 | tissu calleux |
| 7 | 42 | 43 | 1 | 0,24 | 1,122 | compression |
| 8 | 27 | 28 | 1 | 0,71 | <0,0001 | absence |
| 9 | 64 | 64 | 0 | 0,96 | <0,0001 | absence |
| 10 | 31 | 20 | -11 | -0,28 | 0,225 | compression |
| 11 | 56 | 47 | -9 | 0,62 | <0,0001 | réaction |
| 12 | 38 | 26 | -12 | 0,04 | 0,812 | tissu calleux |
| 13 | 40 | 33 | -7 | 0,011 | 0,964 | tissu calleux |
| 14 | 59 | 51 | -8 | 0,73 | <0,0001 | absence |
| 15 | 61 | 56 | -5 | 0,85 | <0,0001 | absence |

Figure 4 - Corrélation entre les séries de largeur de cernes issues de la micrométrie et de la résistographie.

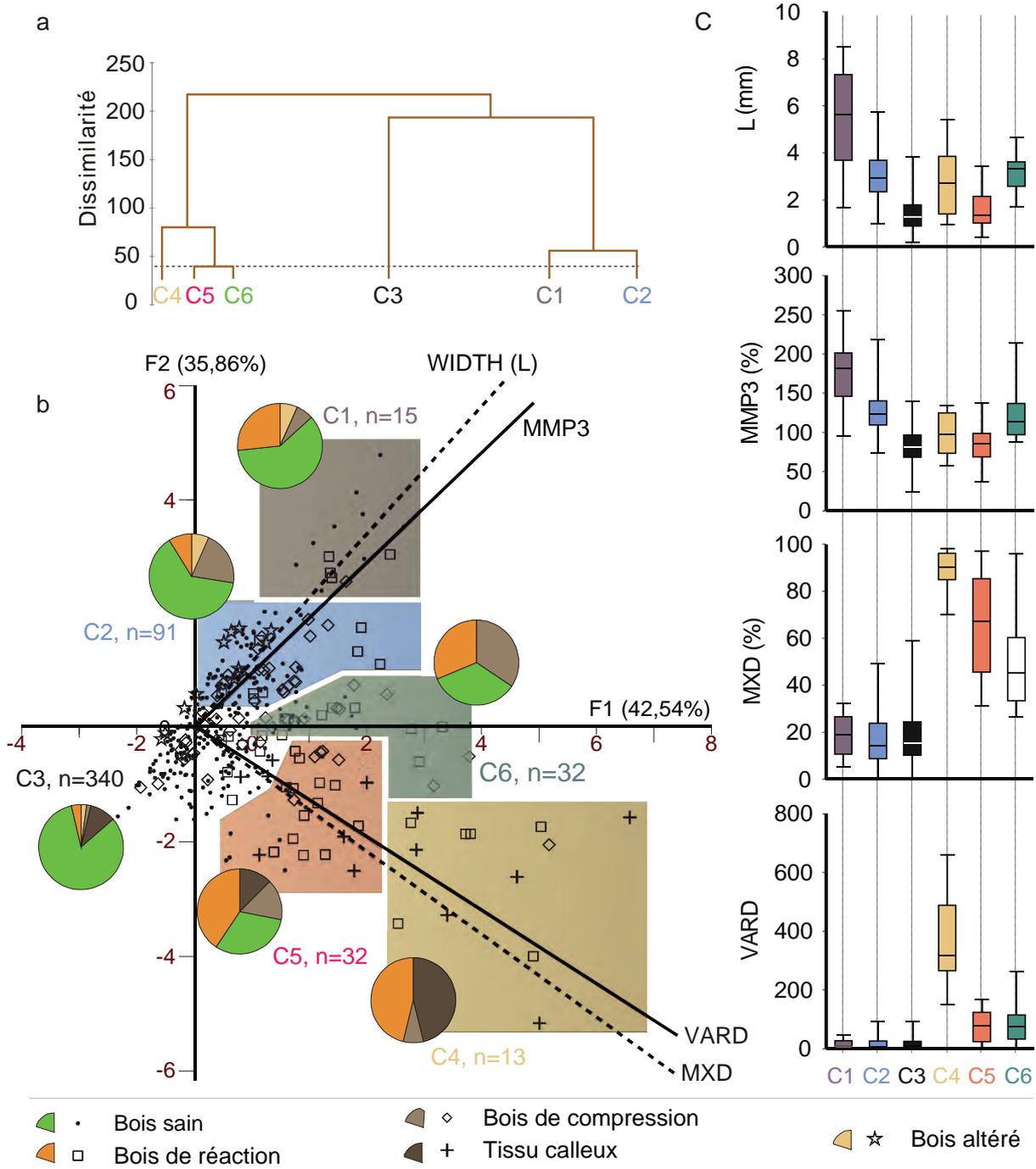


Figure 5 - Principaux résultats de l'analyse multivariée :
 a) classification Ascendante Hiérarchique ;
 b) analyse en Composantes Principales ;
 c) caractéristiques (L, MMP3, MXD et VARD) des classes identifiées.

et six de tissu calleux, de variance et de densité maximale fortes, s'agrègent au sein de cette classe. Plus de 60% de cernes diagnostics forment les classes 5 et 6 (32 individus chacune). Le bois de réaction (13 individus) est dominant dans C5. Les cernes sains et ceux constitués de bois de réaction ou de compression se partagent C6 à parts égales.

Du point de vue temporel, 20 perturbations de croissance intégrées à C4, C5 et C6 correspondent aux années avalancheuses, 1974-1975, 1981-1982, 1987-1988 et 1993-1994 caractérisées notamment par des intensités neigeuses élevées et une stratification du manteau neigeux favorables au déclenchement d'avalanches de plaques (Corona, 2007). Par comparaison,

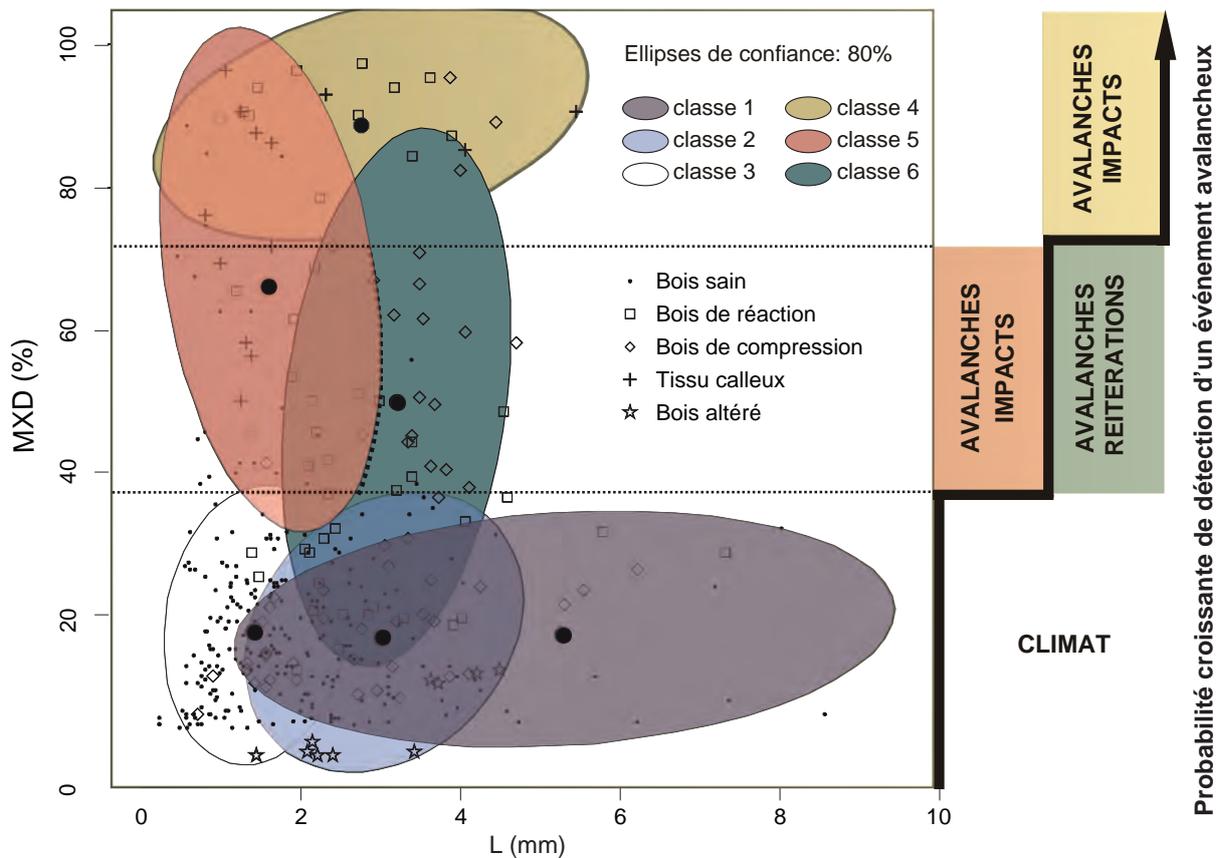
ces perturbations n'apparaissent qu'à 12 reprises dans C1, C2 et C3.

La projection des ellipses à 80% de confiance des six classes issues de la CAH sur le plan largeur / MXD fournit 3 seuils de probabilité d'identification des cerne diagnostics (Figure 6) :

- lorsque le cerne est situé dans les ellipses de confiance des classes 1,2 ou 3, sa densité maximale est inférieure à 40% quelle que soit sa largeur. Sa probabilité (p) d'être diagnostic est inférieure à 0,2 ;

- dans l'ellipse de confiance de C4, la densité est supérieure à 75%, la probabilité d'une perturbation atteint 0,88, celle d'être en présence de bois de réaction est supérieure à 0,4.

Pour une MXD comprise entre 40 et 75%, les ellipses mettent en évidence deux niveaux de probabilité. Une largeur inférieure à 3 mm correspond à une probabilité d'occurrence d'un cerne diagnostic de 0,61, majoritairement sous forme de bois de réaction. Lorsque cette valeur est dépassée, p atteint 0,7 pour le bois de compression.



| MXD (%) | Largeur (mm) | Classes | Bois de réaction (%) | Tissu calleux (%) | Bois de compression (%) | Cernes diagnostics (%) | Diagnostic |
|---------|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| >75 | [0 ; 6] | C4, C5, C6 | 44 | 33 | 11 | 88 | Impact très probable |
| 40-75 | [0 ; 3] | C5, C6 | 40 | 12 | 9 | 61 | Impact probable |
| 40-75 | [3 ; 4,5] | C5, C6 | 20 | 0 | 71 | 91 | Réitération très probable |
| <40 | [0 ; 10] | C1, C2, C3, C5, C6 | 7 | 0 | 12 | 19 | Impact très peu probable |

Figure 6 - Grille d'identification probabiliste des perturbations au sein d'un signal densitométrique.

DISCUSSION

L'utilisation du résistographe permet de reconstituer les séries brutes de largeur de cerne pour des individus qui ne présentent pas de perturbation anatomique majeure. L'identification des cerne annuels est pos-

sible grâce à la signature résistographique caractéristique liée à l'alternance de bois initial à faible densité et de bois final dense. Dans ce contexte, le résistographe permet de déterminer conjointement la largeur

mais également la densité du cerne. Les modifications anatomiques occasionnées par un impact perturbent le signal densitométrique. Elles rendent alors l'interdatation complexe. Ces problèmes ont été mis en évidence sur le sapin de Douglas (Chantre et Rozenberg, 1997).

Le protocole mis en place, basé sur l'utilisation conjointe de la micrométrie et de la résistographie, résout ces difficultés d'interdatation. Les mesures réalisées valident l'utilisation du résistographe pour la mise en évidence de cernes diagnostics qui offrent une résistance mécanique anormale dans un contexte avalancheux et sur *Larix decidua* Mill. Ainsi, 70% des cernes constitués de bois de réaction ou de tissu calleux, seuls marqueurs anatomiques d'un impact, ont une réponse densitométrique particulière. Cette densité relative anormalement élevée concorde avec la structure anatomique particulière du bois de réaction, qui est constitué de cellules denses et à cloisons épaisses, de trachéides courtes, contenant une forte teneur en lignine.

Dans le cas du tissu calleux, la structure irrégulière des cellules qui se forment suite à l'impact est à l'origine de l'anomalie densitométrique.

La grille d'identification des perturbations de croissance résulte de la projection des ellipses de confiance sur le plan largeur / MXD. Ce document synthétique permet, par lecture directe du signal résistographique, d'identifier la présence d'une perturbation anatomique. Il propose également une détection probabiliste du type de perturbation. Compte tenu des difficultés d'interdatation soulignées, la reconstitution d'une chronologie avalancheuse par la seule méthode résistographique s'avère complexe. En revanche, l'utilisation conjointe du résistographe et de la grille fournit un outil pour la spatialisation précise de l'enveloppe des avalanches. Rapide, non destructrice et simple à mettre en oeuvre, cette méthode permet un échantillonnage exhaustif. Elle offre des perspectives en matière de cartographie de l'aléa avalancheux.

BIBLIOGRAPHIE

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes, *Fennia* 105, 1-139.
- ASTRADE L., BRAVARD J.P., LANDON N., 1998. Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre: étude dendrogeomorphologique de deux sites de la vallée de Boulc (Diois, France). *Géographie Physique et Quaternaire*, 52, 153-165.
- BACHRACH T., JAKOBSEN K., KINNEY J., NISHIMURA P., REYES A., LAROQUE C.P., SMITH D.J., 2004. Dendrogeomorphological assessment of movement at Hilda rock glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains. *Geografiska Annaler*, 86A, 1-9.
- Chantre G., Rozenberg P., 1997. Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within profile and within ring density parameters in Douglas fir wood? in Proceedings of CTIA – International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) International Wood Quality Workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End Product Value, Québec, 18–22 August 1997. Edited by S.Y. Zhang, R. Gosselin, and G. Chauret. Forintek Canada Corp., Sainte Foy. pp. 41-47.
- CORONA C., 2007. Evolution biotique du paysage, géodynamique nivéo-péglaciaire et fluctuations climatiques récentes dans la haute vallée de la Romanche (Alpes du Nord France). Thèse de doctorat en Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 752 p.
- COWN D.J., CLEMENT B.C., 1983. A wood densitometer using direct scanning with X-rays. *Wood Science and Technology*, 17, 91-99.
- FRANCOU B., MANTÉ C., 1990. Analysis of the segmentation in the profile of alpine talus slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1, 53-60.
- Petitcolas V., 1998. Dendroécologie comparée de l'épicéa, du mélèze, du pin cembro et du pin à crochets en limite supérieure de la forêt dans les Alpes françaises: influence de la variabilité macroécologique. Thèse de Doctorat en Biologie, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 186 p.
- POLGE H., KELLER R., 1970. Première appréciation de la qualité du bois en forêt par utilisation d'un torsiomètre. *Annales des Sciences forestières*, 27, 197-223.
- RAYBACK S.A., 1998. A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical Geography*, 19, 502-515.
- RINN F., SCHEWEINGRUBER F.H., SCHAR E., 1996. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, 50, 303-311.
- SPRAGUE J.R., TALBERT J.T., JETT J.B., BRYANT R.L., 1983. Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine, *Forest Science*, 29, 696-701.
- STEFANINI M.C., 2004. Spatio temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology*, 63, 191-202.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M.A., RAETZO H., GÄRTNER H.W., MONBARON M., 2005. 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 387-395.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., MONBARON M., PERRET S., 2005. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 89-106.
- STOFFEL M., 2006. A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards*, 39, 51-70.

L'APPORT DES SÉRIES DENDROCHRONOLOGIQUES FRANÇAISES AU PROLONGEMENT DE LA CHRONOLOGIE EUROPÉENNE ABSOLUE ET À LA CALIBRATION DU RADIOCARBONE

FRENCH LATEGLACIAL TREE-RING CHRONOLOGIES: A CONTRIBUTION TO EXTEND ABSOLUTE TREE-RING CHRONOLOGY AND RADIOCARBON CALIBRATION CURVE

CÉCILE MIRAMONT¹, FRÉDÉRIC GUIBAL¹, KLAUS FELIX KAISER^{2,3}, BERND KROMER⁴, MARIO SGIER^{2,3},
OLIVIER SIVAN⁵, MICHAEL FRIEDRICH⁶, SAHRA TALAMO⁷

¹ Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléocologie, UMR 6116-CNRS, Europôle méditerranéen de l'Arbois, Batiment Villemin, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 04.

² Swiss Fed. Research Institute WSL, CH 8903 Birmensdorf,

³ Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH 8057 Zurich.

⁴ Heidelberg Academy of Sciences, INF 229, D 69120 Heidelberg.

⁵ Institut National de Recherches Archéologiques Préventives / CEPAM UMR 6130-CNRS,
24 avenue de la Grande Bégué Immeuble le Mozart, F 13770 Venelles.

⁶ Institute of Botany (210), University of Stuttgart-Hohenheim, D 70593 Stuttgart.

⁷ Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Department of Human Evolution, D 04103 Leipzig.

Contact : cecile.miramont@univ-provence.fr

RÉSUMÉ

Jusqu'au début de l'Holocène, l'étalonnage de l'échelle des temps radiocarbone repose sur la chronologie de cernes absolue européenne qui remonte jusqu'en 12594 cal BP (Schaub et al., 2008a). Au-delà, des séquences dendrochronologiques tardiglaciaires existent mais un hiatus les sépare encore de la chronologie absolue. L'enjeu est de relier les séquences absolues et flottantes, étendant ainsi la courbe de calibration du radiocarbone jusqu'au début du Tardiglaciaire et évitant les incertitudes liées aux variations d'effet-réservoir dont souffrent les courbes de calibrations basées sur les données marines. Les objectifs de cet article sont de présenter (1) les avancées récentes dans la constitution des chronologies tardiglaciaires européennes et (2) les potentialités offertes par les chronologies de cernes flottantes tardiglaciaires issues des arbres subfossiles (*Pinus silvestris*) découverts dans les Alpes du sud. Ces arbres fournissent de nouvelles chronologies moyennes datées du Bölling-Alleröd et du Dryas Récent. Elles permettent, par la méthode du « wiggle matching » de combler le hiatus existant entre la séquence absolue européenne et les séquences flottantes.

MOTS-CLÉS : BOIS SUBFOSSILE, PINUS SILVESTRIS, TARDIGLACIAIRE, RADIOCARBONE, CHRONOLOGIE ABSOLUE, CHRONOLOGIES FLOTTANTES, « WIGGLE MATCHING ».

ABSTRACT

Absolutely dated tree ring chronologies have been used to establish a high precision radiocarbon data set. That serves as a backbone for the absolute calibration of the radiocarbon time-scale back to 12594 cal BP (Schaub et al., 2008a). Lateglacial floating tree ring chronologies exist but a gap still remains between them and the absolute European chronology. The challenge is to link absolute and Lateglacial chronologies, overcoming uncertainties due to changes in the reservoir age of marine data used for the radiocarbon calibration before the onset of the Holocene. In this paper (1) we will give the actual 'state of the art' of existing absolutely dated tree-ring chronology and floating tree-ring chronologies of the LateGlacial and (2) we will present potential revealed by floating chronologies (*Pinus silvestris*) from Southern French Alps. The French Lateglacial floating chronologies are dated to Bölling-Alleröd and to onset of Younger Dryas. By means of wiggle-matching method, these new tree-ring based ¹⁴C records bridge the gap between European tree-ring based radiocarbon dating series.

KEYWORDS: SUBFOSSIL PINES, PINUS SILVESTRIS, LATEGLACIAL, RADIOCARBON, ABSOLUTE CHRONOLOGIES, FLOATING CHRONOLOGY, WIGGLE MATCHING.

INTRODUCTION

La datation au radiocarbone constitue un outil universel et incontournable pour dater de façon absolue les vestiges organiques sur lequel reposent les reconstitutions paléoenvironnementales, paléoclimatiques et archéologiques. Mais il est indispensable que les âges ^{14}C (exprimés en années BP, Before Present, le présent étant l'année 1950) puissent être étalonnés avec précision sur le calendrier solaire (âges exprimés en années calendaires : cal BP). Le décalage entre les dates ^{14}C et les années calendaires, dû à la variabilité de la quantité de ^{14}C atmosphérique (Muscheler *et al.*, 2000), a été mis en évidence en mesurant l'âge radiocarbone des cernes de croissance de vieux arbres d'âges connus (Pearson *et al.*, 1993 ; Stuiver et Becker, 1993).

La calibration du radiocarbone jusqu'au début de l'Holocène, est réalisée grâce aux séries dendrochronologiques de référence pluri-millénaires établies à partir de bois archéologiques et de bois subfossiles (non encore minéralisés) (Stuiver *et al.*, 1998 a, b ; Reimer *et al.*, 2004, 2009). Antérieurement, la calibration du radiocarbone est effectuée sur des enregistrements marins de varves ou de coraux (Reimer *et al.* 2002 ; 2004 ; Bard *et al.* 2004 ; Hughen *et al.* 2004). Mais, les eaux de surface où vivent les organismes marins possèdent une teneur en radiocarbone intermédiaire entre l'atmosphère et les eaux profondes pauvres en ^{14}C . Ainsi, un décalage d'âge existe entre des organismes contemporains continentaux et marins : c'est

ce que l'on appelle l'effet-réservoir mondial (R) qui est égal à 400 ans pour l'ensemble de l'Holocène. Les travaux récents 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 (Stuiver et Braziunas, 1993 ; Fairbanks *et al.*, 2005 ; Kromer *et al.*, 2004 ; Cao *et al.* 2007 ; Hua *et al.*, 2009).

Ainsi, seuls les arbres peuvent fournir des mesures fiables de la teneur en radiocarbone atmosphérique à une échelle de temps calendaire. Pour cette raison, il apparaît aujourd'hui fondamental de prolonger la courbe de calibration du ^{14}C obtenue à partir des chronologies de cernes. A l'heure actuelle, la plus longue chronologie servant de référence pour la calibration du radiocarbone couvre les 12 594 dernières années (Shaub *et al.*, 2008a ; Hua *et al.*, 2009). Récemment, de nouvelles découvertes de bois subfossiles dans le Sud de la France et dans les environs de Zurich fournissent des chronologies de cernes qui peuvent permettre la prolongation de la calibration du radiocarbone. Les objectifs de l'article sont :

- présenter les avancées récentes en matière de calibration du radiocarbone à partir des données de cernes ;
- présenter l'apport et les potentialités des données dendrochronologiques des bois subfossiles découverts dans les Alpes du Sud.

I - LES ÉTAPES RÉCENTES DANS LA CALIBRATION DU RADIOCARBONE

1 - La construction de la chronologie absolue

La chronologie absolue (ou chronologie de référence) européenne a été construite en plusieurs étapes. L'équipe de B. Becker du laboratoire d'Hohenheim a constitué, à partir de plus de 4400 troncs de chênes subfossiles provenant des terrasses alluviales des grands fleuves d'Europe centrale (Main, Danube, Rhin...), une longue chronologie qui s'étend jusqu'à 10429 cal BP (Holocene Oak Chronology, HOC, Becker 1993 ; Friedrich et Henning 1996 ; Spurk *et al.*, 1998). Au-delà de cette date, les arbres subfossiles découverts dans les alluvions des mêmes sites sont des pins sylvestres qui ont été synchronisés en une chronologie flottante (Preboreal Pine Chronology PPC). La co-existence des pins et des chênes dans les forêts alluviales est courte, mais néanmoins suffisante pour permettre la synchronisation des séquences de cernes des deux espèces. Ainsi, avec l'appui de la méthode du « wiggle matching », Spurk *et al.* (1998) et Friedrich *et al.* (1999) étendent la chronologie de référence jusqu'en 11919 cal BP, puis jusqu'en 12410 cal BP (Friedrich *et al.*, 2004), fournissant ainsi les données nécessaires à la courbe de calibration du radio-

carbone Intcal04 (Reimer *et al.*, 2004). Les travaux les plus récents réalisés dans les environs de Zurich (Gaenziloh, Birmensdorf) permettent aujourd'hui de reculer cette limite à 12594 cal BP (Shaub *et al.*, 2008a ; Hua *et al.*, 2009) ; ils sont intégrés à la nouvelle courbe de calibration Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009 ; Figure 1).

2 - Les chronologies flottantes tardiglaciaires

De nombreuses chronologies flottantes existent pour la période Tardiglaciaire (Figures 1 et 2). En France, dans les Alpes du Sud, de très nombreux gisements de pins subfossiles holocènes et tardiglaciaires ont été repérés dans la région de Sisteron (Sivan et Miramont, 2008 ; Miramont *et al.*, 2000 a, b). Ils ont permis de construire des chronologies flottantes pluricentennales datées de la transition Bölling-Alleröd (~12000-11800 BP) et du Dryas Récent (~10600 BP). En Italie, à la suite des travaux de Corona (1984), Friedrich *et al.*, (1999) ont construit les deux chronologies flottantes les plus anciennes (Older Dryas Larch Chronologies - ODLC), couvrant une partie

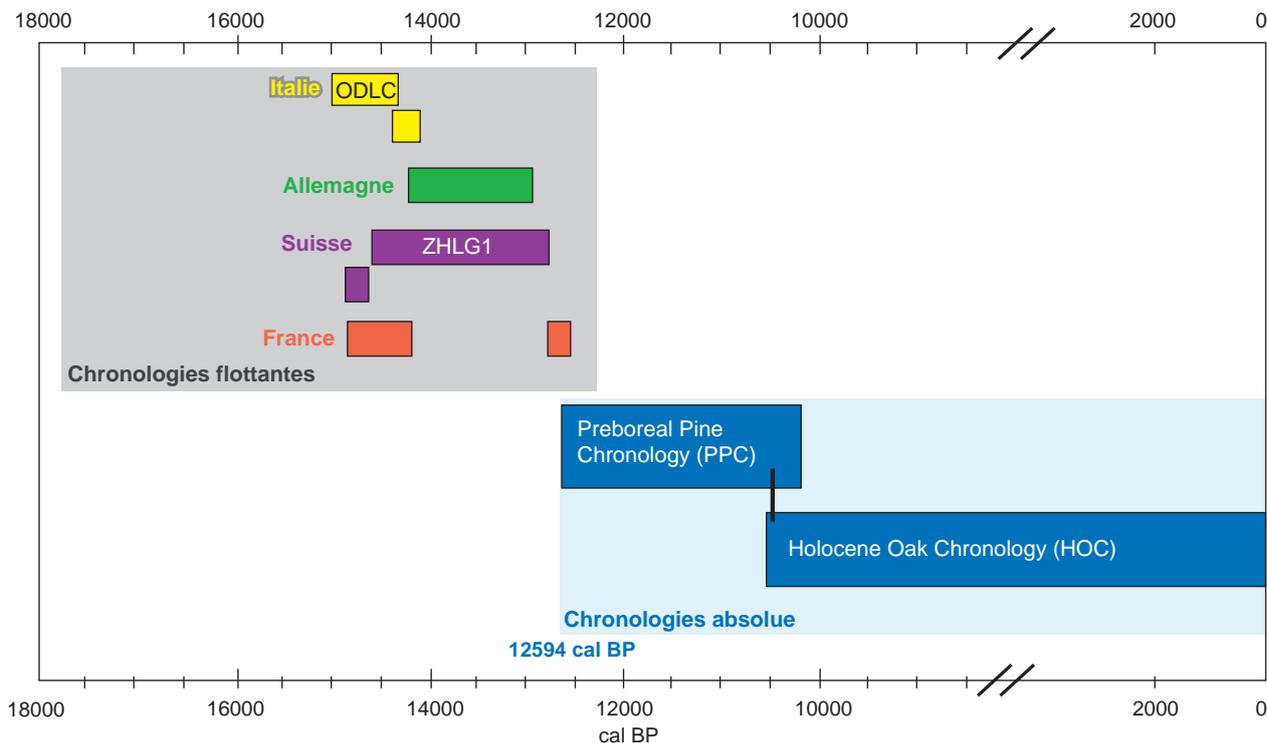


Figure 1 - Inventaire simplifié des chronologies flottantes et absolues européennes (d'après Friedrich et al., 2001, modifié).

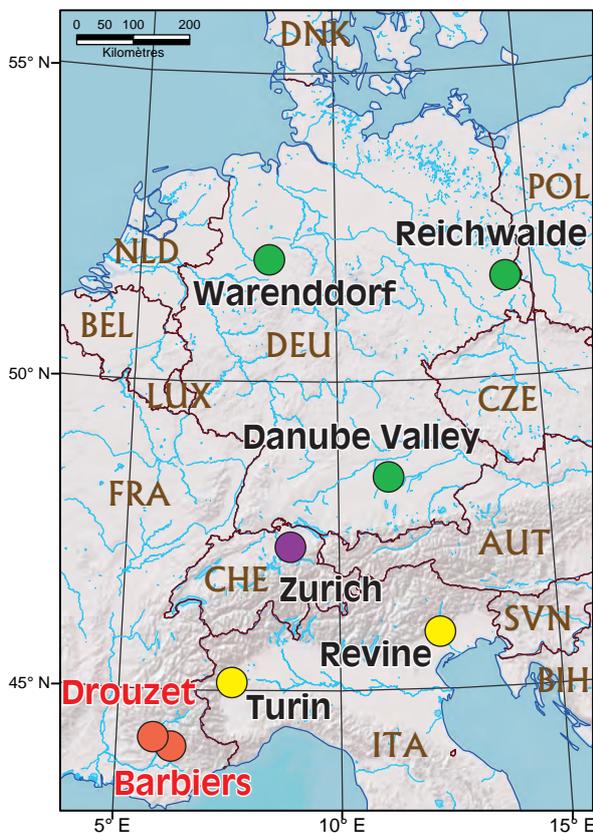


Figure 2 - Localisation des principaux gisements de bois sub-fossiles tardiglaciaires en Europe (d'après Friedrich et al., 2001, modifié).

du Bölling (~15200-14300 BP) à partir de mélèzes retrouvés dans des tourbières près de Revine. D'autres bois plus récents ont été découverts dans les environs de Turin datés du début de l'Alleröd. En Suisse, Kaiser (1993) puis Schaub *et al.* (2005, 2008 a, b) ont construit plusieurs chronologies flottantes à partir de pins sylvestres découverts dans des colluvions de pied de versant des environs de Zurich. La plus ancienne couvre la fin du Bölling et le début de l'Alleröd. La plus longue chronologie (ZHLG1) couvre une période de 1420 ans de l'Alleröd au début du Dryas Récent (~14170-12750 cal BP). En Allemagne, Friedrich *et al.*, (1999, 2001) a construit plusieurs longues chronologies pluri-centenaires flottantes à partir de pins fossilisés dans des dépôts d'alluvions du nord et de l'est du pays et de la vallée du Danube.

Au-delà de toute attente, Friedrich *et al.* (2001) 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 en une longue chronologie de 1051 ans. Ce résultat suggère l'importance du contrôle des températures sur la croissance des arbres (*Pinus sylvestris*) à cette période. Dans ces chronologies flottantes plurimillénaires tardiglaciaires sont reconnus des changements climatiques majeurs tels que le refroidissement du Dryas Ancien ou l'oscillation de Gerzensee (Friedrich *et al.* 2001 ; Schaub, 2008 b).

3 - Un hiatus dendrochronologique à la transition entre l'Alleröd et le Dryas Récent

Malgré l'abondance des données disponibles, la connexion dendrochronologique entre la chronologie absolue et les chronologies flottantes tardiglaciaires n'est pas encore réalisée. Un hiatus persiste au début du Dryas Récent. Il s'explique par des découvertes d'arbres moins fréquentes, conséquences de la dégradation climatique bien connue pour cette période.

La croissance des arbres est irrégulière, le bois n'est pas toujours bien préservé et les chronologies individuelles sont plus courtes que lors des autres périodes du Tardiglaciaire (Schaub *et al.*, 2008a). L'enjeu est important puisque le comblement de ce hiatus permettrait de rallonger de plus de 1800 ans la calibration de l'échelle des temps radiocarbone sur données continentales, résolvant ainsi les incertitudes de calibration liées aux variations de l'effet-réservoir au début du Dryas Récent (Muscheler *et al.*, 2008, Hua *et al.*, 2009).

II - À LA RECHERCHE DU CHAÎNON MANQUANT : LES TRAVAUX MENÉS DANS LES ALPES DU SUD

1 - Les gisements de pins sylvestres subfossiles

De très nombreux gisements d'arbres subfossiles holocènes et tardiglaciaires ont été recensés dans les Alpes du Sud, en particulier dans la Moyenne Durance aux environs de Sisteron (Figure 3) (Archambault, 1967, 1968, Delibrias *et al.*, 1984, Gautier, 1992, Rosique 1994, 1996, Miramont, 1998, Rousset et Guiomar, 1999 ; Sivan, 2002, ; Miramont *et al.*, 2000ab ; Magny *et al.*, 2002 ; Sivan *et al.*, 2006 ; Sivan

et Miramont, 2008). Leur présence est liée à l'intensité des processus érosifs et sédimentaires. Le substrat géologique est majoritairement marneux (« terres noires » callovo-oxfordiennes) ; les dénivelées sont importantes ; l'agressivité du climat montagnard est renforcée par l'intensité et l'irrégularité des précipitations de régime méditerranéen.

Les souches apparaissent dans les fonds des torrents ou dans les berges, parfois sur plusieurs niveaux stratigraphiques superposés (Figures 4 et 5). Les diamètres moyens des souches s'étendent entre 25 et 38 cm et

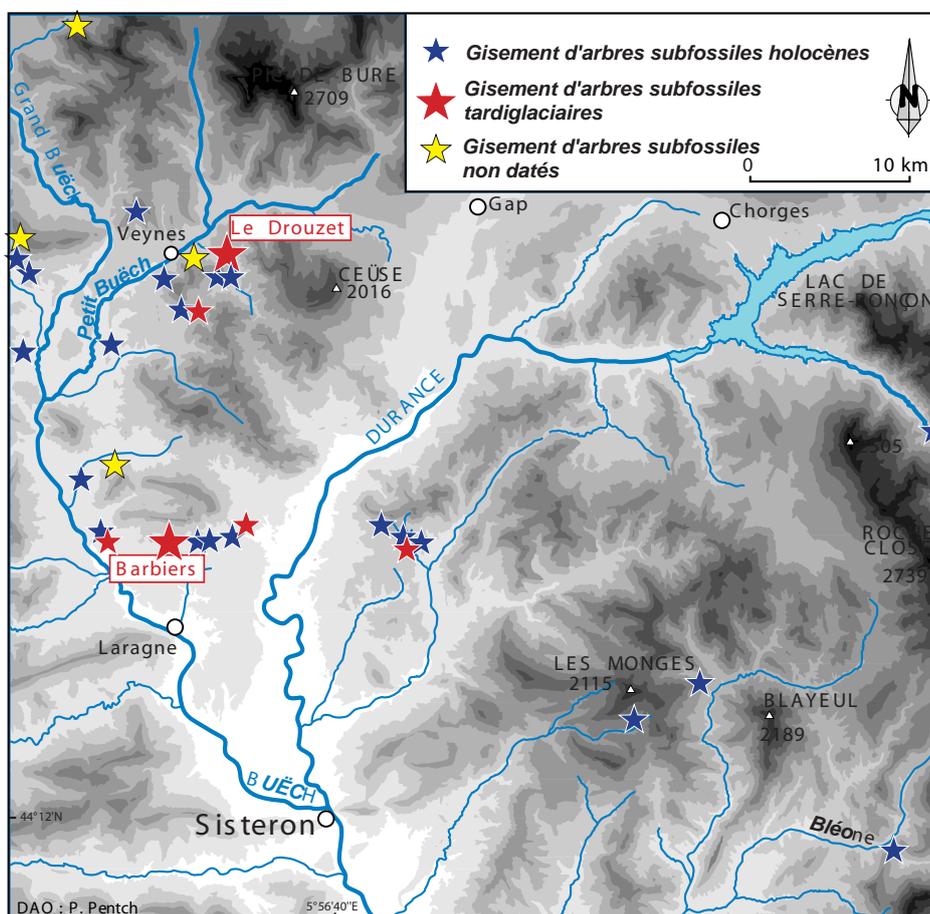


Figure 3 - Localisation des gisements d'arbres subfossiles dans les Alpes du Sud.

Figure 4 - Un pin sylvestre subfossile dans le torrent du Drouzet (environ 14000 cal BP). L'arbre apparaît à la faveur de l'incision du torrent, enfouis dans des limons-sableux.



Figure 5 - Les pins sylvestres du torrent des Barbiers (environ 12700 cal BP).



leur hauteur conservée est souvent d'un mètre. Les âges moyens sont ceux d'individus adultes, entre 130 et 300 ans au moment de leur fossilisation. Il est difficile de les distinguer de souches d'arbres morts récemment si ce n'est par leur position anormale dans les torrents et leur odeur très particulière due à la résine qui se dégage lors de leur échantillonnage à la tronçonneuse. Pourtant les « anciens » du pays connaissaient bien ces bois étranges qui apparaissaient dans les torrents. Ils racontent encore comment, lorsque le manque de bois de chauffage se faisait trop cruellement sentir, ils brûlaient dans le poêle ou la cheminée les « tias » (nom local donné aux pins subfossiles). Ils ne le faisaient que rarement car une odeur désagréable envahissait alors leur maison ! Certains racontent même qu'ils en utilisaient des morceaux pour fabriquer des torches pour aller pêcher la nuit !

2 - Chronologies de cernes et datations radiométriques

Les travaux récents ont porté en priorité sur les gisements de pins datés du Tardiglaciaire dans le but de trouver des séquences de cernes permettant de prolonger la chronologie européenne absolue et d'améliorer la réplique des chronologies flottantes. Deux sites principaux ont été étudiés : le torrent du Drouzet et celui des Barbiers (Figure 3). Les chronologies de cernes ont été mesurées sous loupe binoculaire. Les tests de synchronisation, effectués à l'aide du logiciel TSAP (Rinn, 2003), se fondent sur le pourcentage de coïncidence (Gleichlaufigkeit), sur le test de Student calculé sur les séries indicées (Baillie et Pilcher, 1973) et sur la longueur de chevauchement entre les chronologies. Les positions les plus intéressantes parmi celles délivrées par les tests statistiques font systématiquement l'objet d'une vérification de la concordance visuelle des courbes de croissance correspondantes.

a - Des enregistrements à haute résolution dès la fin du Bölling

Le site du torrent du Drouzet (44°32'N ; 5°51'50E), affluent de rive gauche du Petit Buëch, repéré il y a une dizaine d'années par Sivan (2002), est un gisement important de pins subfossiles (Sivan et Miramont, 2008) dans lequel de nouveaux arbres ont été découverts en 2008. Plus d'une centaine d'arbres sont enracinés *in situ* dans des sédiments limoneux-sableux riches en macro-restes végétaux (débris de racines, pommes de pins, etc). Les bois sont répartis sur au moins trois niveaux stratigraphiques superposés. Ils témoignent de la reconquête forestière après le dernier maximum glaciaire et du début de la tendance à l'aggradation dans les rivières.

Des stress d'origine géomorphologiques ont per-

turbé la croissance de ces pins qui enregistrent des chutes de croissance brutales, des périodes de croissance très faible et des cicatrices fréquentes. Malgré des difficultés, 72 chronologies d'arbres ont été mesurées et synchronisées en 6 séquences moyennes (DRA, DRB, DRC, DRD, DRE et DRF) (Figure 6a). Une dizaine d'arbres n'ont pu être interdatés encore. Une vingtaine de troncs sont encore en cours d'étude. Les âges radiocarbone (20 datations) s'échelonnent entre 12500 et 11800 BP (Bölling-Alleröd).

Certaines séquences individuelles présentent des tests de synchronisation assez bons avec les chronologies contemporaines suisses des environs de Zurich (chronologie DAETBOECH et ZCHLG1 Figure 6a (Kaiser *et al.* sous presse). Si, aujourd'hui, l'interdatation des séries n'est pas encore assez robuste, la possibilité de rassembler les séquences de cernes dans une chronologie moyenne franco-suisse existe.

b - Des chronologies du Dryas récent : un lien possible entre chronologies flottantes et absolue

Le gisement de bois du torrent des Barbiers (44°21'11"N ; 5°49'50"E) a été repéré en 2000 (Sivan, 2002 ; Sivan et Miramont, 2008). Récemment, de nouveaux arbres ont été découverts dans un affluent de rive gauche. Au total, 18 arbres sont recensés, répartis dans trois couches de sédiments superposés.

Les datations radiocarbone (réalisées sur des échantillons de 10 cernes repérés dans les chronologies) montrent que les arbres du site des Barbiers sont datés à la transition entre l'Alleröd et le Dryas Récent. Ainsi, ce site revêt une importance majeure puisque les séries dendrochronologiques offrent la potentialité de combler le hiatus existant entre la chronologie absolue européenne et les longues chronologies tardiglaciaires flottantes.

Deux chronologies moyennes BARBA (6 arbres) et BARBB (3 arbres) ont été construites (Figure 6b). Les neuf autres bois analysés ont fourni des séquences individuelles qui ne sont pas synchronisées.

La méthode du « wiggle matching » (mise en concordance des oscillations des nuages de points représentant les datations radiocarbone des cernes de croissance) permet de positionner précisément dans le temps les séquences des cernes. Les deux chronologies moyennes BARBA et BARBB datées entre 11050 et 10600 BP enregistrent, comme la partie récente de la chronologie tardiglaciaire flottante de Zurich (ZHLG1, Schaub *et al.* 2008a,b), la diminution très rapide des âges radiocarbone qui caractérise le début du Dryas Récent (phénomène provoqué par une augmentation de la teneur en ¹⁴C atmosphérique) (Kromer *et al.* 2004). De plus, la forme du nuage de points constitué par les dates ¹⁴C réalisées sur l'arbre Barb17 composant la fin de la chronologie BARBA est similaire à celle des dates ¹⁴C des arbres consti-

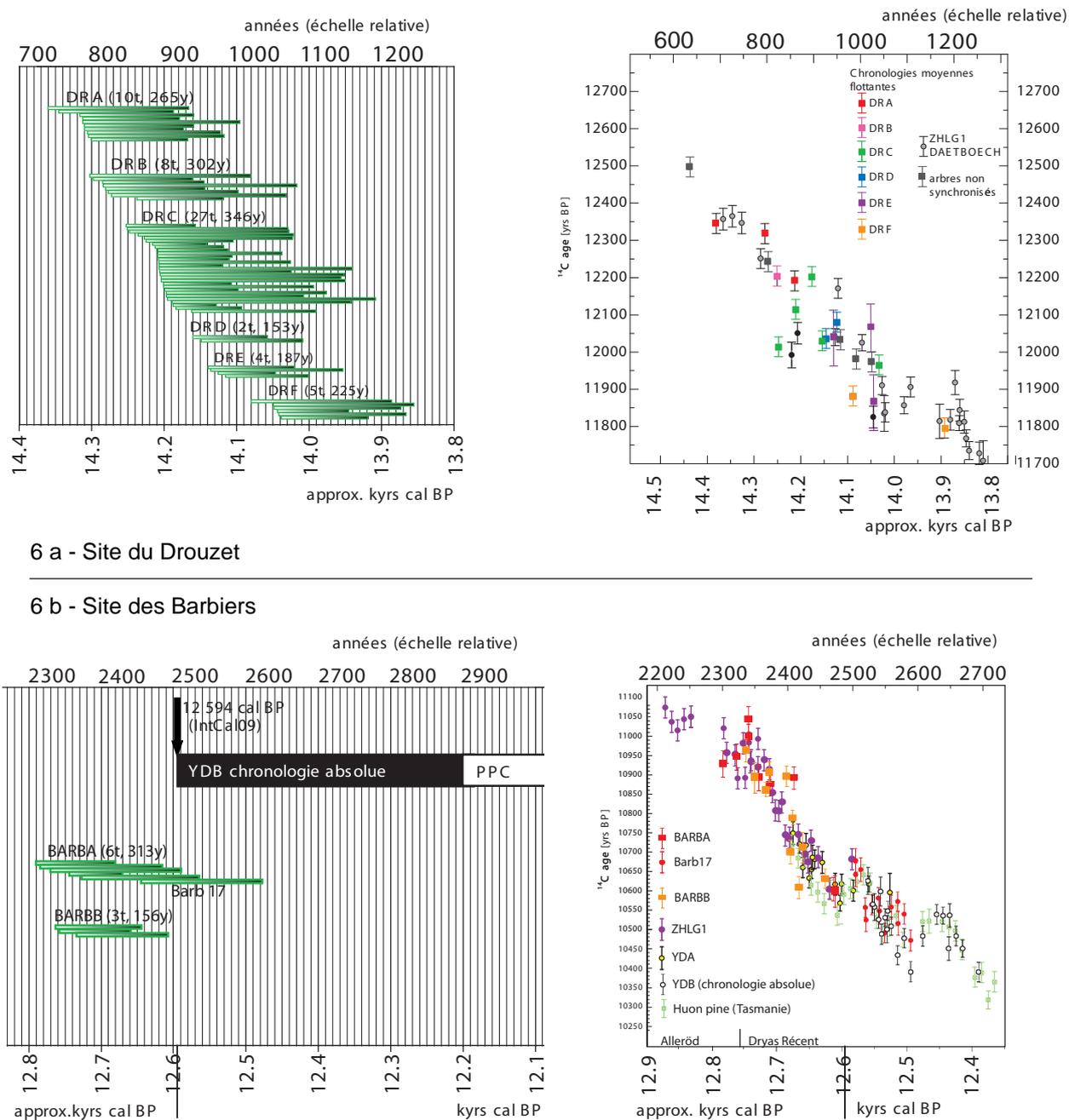


Figure 6 - Chronologies moyennes tardiglaciaires et datations radiocarbone dans les Alpes du sud. A gauche : séquences individuelles composant les chronologies moyennes. A droite : âges ^{14}C des échantillons de bois (10 cernes) positionnés dans les séquences moyennes.

tuant le début de la chronologie absolue (YDB). Ainsi les séquences dendrochronologiques des Barbiers couvrent le hiatus temporel entre la chronologie absolue et les chronologies tardiglaciaires flottantes. Malheureusement, aucune synchronisation des variations de largeur des cernes n'a encore pu être établie entre les séquences suisses et françaises.

Nos résultats sont en parfaite concordance avec les données publiées par Hua *et al.* (2009) qui, grâce à la méthode du « wiggle matching » proposent de relier la chronologie absolue et les chronologies flottantes tardiglaciaires européennes, comblant ainsi le

hiatus temporel (Figure 6b). 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 Durance 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 atmos-

phérique 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 (~12760 cal BP) a lieu ~240 ans plus tard que dans l'enregistrement marin de Cariaco (Hughen *et al.*, 2004) 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 12550-12950 cal BP, les données marines de Cariaco ne sont pas utilisées dans la nouvelle version de la courbe de calibration Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009).

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 12594 cal BP et la longue chronologie flottante tardiglaciaire suisse (ZHLG1), fournissant ainsi un calendrier continu du temps du radiocarbone pour les derniers 14 000 ans. Mais, alors que de bonnes synchronisations entre les séquences moyennes tardiglaciaires du nord, de l'est, du sud-est de l'Allemagne et du plateau Suisse sont avérées, les arbres de Moyenne Durance ne permettent pas de couvrir le hiatus entre la chronologie absolue et les chronologies flottantes tardiglaciaires sur la seule base des corrélations dendrochronologiques. 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 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. Bouterin, 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.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHAMBAULT M., 1967. Découverte des restes d'une formation forestière fossile entre deux nappes colluviales quaternaires. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 265, 104-107.
- ARCHAMBAULT M., 1968. Recensement provisoire des arbres et des formations forestières fossiles du bassin de la Moyenne Durance (Hautes Alpes). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 267, 101-2104 et 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, 1189-1202.
- BECKER B., 1993. A 11,000-year German Oak and Pine dendrochronology for radiocarbon calibration. *Radiocarbon*, 35, 201-213.
- 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, 732-742.
- CORONA E., 1984. Una curva trisecolare per larice del Dryas Antico. *Dendrochronologia*, 2, 83-89.
- DELIBRIAS G., GABERT, J., JORDA M., 1984. Données nouvelles sur la chronostratigraphie et l'évolution paléomorphologique postglaciaire des Alpes du Sud (Moyenne Durance). *C.R. Acad. Sci.*, II, 299, 263-266.
- 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., HENNING H., 1996. Dendrodate for the Wehringen Iron Age wagon grave (778± 5 BC). *Journal of European Archaeology*, 4, 281-303
- FRIEDRICH M., KROMER B., KAISER K.F., SPURK M., HUGHEN K.A., JOHNSEN S.J., 2001. High-resolution climate signals in the Bølling-Allerød Interstadial (Greenland Interstadial) as reflected in European tree-ring chronologies compared to marine varves and ice-core records. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1223-1232.
- 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, 27-39.
- FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., HOFMANN 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 paleo-environment reconstructions. *Radiocarbon*, 46 (3), 1111-1122.
- GAUTIER E., 1992. Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buëch (Alpes du Sud). Thèse de géographie, Université de Paris-X-Nanterre, 439 p.
- HOGG A., PALMER J., BOSWIJK G., BRONK RAMSEY C., TURNEY C., McCORMAC G., BROWN D., 2009. Assessment of the integrity of the Southern Hemisphere ¹⁴C 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, 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 ¹⁴C variations derived from tree rings during the early Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*, 28 (25-26), 2982-2990.
- HUGHEN K.A., SOUTHON J.R., BERTRAND C.J.H., FRANTZ B., ZERMENO P., 2004. Cariaco basin calibration update: revisions to calendar and ¹⁴C chronologies for core PL07-58PC. *Radiocarbon*, 46, 1161-1187.
- 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., sous presse. Challenging process to make the Late-glacial tree-ring chronologies from Europe absolute - an inventory. *Quaternary Sciences Reviews*.
- 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), 1203-1209.
- 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, 47-59.
- MIRAMONT C., 1998. Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance. Thèse de doctorat de Géographie, Université d'Aix-Marseille I, 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.
- MUSCHELER R., BEER J., WAGNER G., FINKEL R.C., 2000. Changes in deep-water formation during the Younger Dryas event inferred from 10Be and ¹⁴C records. *Nature*, 408, 567-570.
- MUSCHELER R., KROMER B., BJÖRCK S., SVENSSON A., FRIEDRICH M., KAISER K. F., SOUTHON J., 2008. Tree rings and ice cores reveal ¹⁴C calibration uncertainties during the Younger Dryas. *Nature Geoscience*, 1, 263-267.
- PEARSON G. W., BECKER B., QUA F., 1993. High-precision ¹⁴C measurement of German and Irish oaks to show the natural ¹⁴C variations from 7890 to 5000 BC. *Radiocarbon*, 35, 93-104.
- 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., GUILDERSON 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, 2009, 1111-1150.
- 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., GUILDERSON 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., HUGHEN K-A., GUILDERSON 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.
- RINN F., 2003. TSAP - Time Series Analyses and presentation dendrochronology and related applications. Franck Rinn, Heidelberg.
- 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 paléocologique. *C.R Acad. Sci.*, 319 (II), 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 de Géographie, Université d'Aix-Marseille I, 288 p.
- ROUSSET C., GUIOMAR M., 1999. Le début de la torrentialité dans le bassin versant de la Fontarasse, près de Barles (Alpes-de-Haute-Provence, France), marqueur d'une rupture climatique de l'Holocène ancien. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 328, 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., KAISER K. F., FRANK D-C., BUENTGEN U., KROMER B., TALAMO T., 2008 a. Environmental change during the Allerød and Younger Dryas reconstructed from tree-ring data. *Boreas*, 37, 74-86.
- SCHAUB M., BUNTGEN U., KAISER K. F., KROMER B., TALAMO S., ANDERSEN K-K., RASMUSSEN S-O., 2008 b. 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 de géographie, Université Aix-Marseille I, 241p.
- 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., EDOUARD J.-L., 2006. Rythmes de la sédimentation et interprétations paléoclimatiques lors du Postglaciaire dans les Alpes du Sud. ^{14}C et dendrogéomorphologie, deux chronomètres complémentaires. In ALLEE Ph., dir., LESPEZ L. dir. - L'érosion entre société, Climat et Paléoenvironnement. Table ronde de Clermont-Ferrand en l'honneur de R. NEBOIT-GUILHOT (25-27 mars 2004), Clermont-Ferrand, Presses universitaires Blaise-Pascal, 2006.
- SPURK M., FRIEDRICH M., HOFMANN J., REMMELE S., FRENZEL B., LEUSCHNER H.H., KROMER B., 1998. Paleo-environment and radiocarbon calibration as derived from Lateglacial/Early Holocene tree-ring chronologies. *Quaternary International*, 61, 27-39.
- STUIVER M., BECKER B., 1993. High-precision calibration of the radiocarbon time scale AD 1950-6000 BC, *Radiocarbon*, 35, 35- 65.
- STUIVER M., BRAZIUNAS T. F., 1993. Modeling atmospheric ^{14}C influences and ^{14}C ages of marine samples back to 10,000 BC. *Radiocarbon*, 35, 137-189.
- STUIVER M., REIMER P.J., BARDE E., BECK J.W, BURR G.S., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., VAN DER PLICHT J., SPURK M. 1998 a. 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, 1127-1151.

ANTHRACOLOJ

UN OUTIL POUR LA SIMPLIFICATION DES MESURES DENDROMÉTRIQUES

ANTHRACOLOJ, A TOOL FOR THE SIMPLIFICATION OF DENDROMETRIC MEASUREMENTS

SANDRINE PARADIS-GRENOUILLET, JEAN-PHILIPPE LELEU, CHRISTELLE BELINGARD,
ROMAIN ROUAUD, PHILIPPE ALLEE

Géolab Limoges, 39 E rue Camille Guérin, F 87000 Limoges.

Contact : s.paradis@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

Appréhender le calibre et la croissance des bois archéologiques est indispensable pour comprendre la gestion de la ressource en bois par les sociétés du passé. Ces informations scientifiques passent, pour l'essentiel, par l'étude des cernes de croissance (rayons de courbures, largeurs de cernes...). Sur les échantillons anthracologiques, la mise en œuvre de techniques dendrométriques sous analyseur d'images permet de gagner en fiabilité et en précision (Paradis, 2007). Cependant, longues et fastidieuses, ces techniques sont particulièrement chronophages. En automatisant la mesure de la distance d'un cerne par rapport au cœur du bois (rayon manquant ou rayon de courbure), l'outil AnthracoloJ, mis au point par le laboratoire Géolab favorise la multiplication et l'homogénéisation des analyses et permet d'envisager leur mise en routine. L'utilisation de cette application, développée sous le logiciel libre « ImageJ », simplifie considérablement la prise de mesure : quelques points caractéristiques suffisent désormais pour calculer la distance entre le dernier cerne et le cœur du bois.

MOTS-CLÉS : RAYON MANQUANT, RAYON DE COURBURE, SIMPLIFICATION DE LA MESURE, ÉVALUATION DE L'ERREUR.

ABSTRACT

The study of the diameter and the growth of archaeological wood is indispensable for the understanding of wood supply management. Measurements of the radius curvature and the widths of rings can be obtained by the observation of the growth rings which are a good gauge. Using image analysis allows for the best accuracy of measurement, but these techniques are particularly time consuming. The creation of the AnthracoloJ application by Géolab laboratory permits the proliferation and the standardization of a part of these measurements. Using this method, only characteristic points are necessary to calculate a radius (the distance between the outer ring and the heart of wood).

KEYWORDS: MISSING RADIUS, RADIUS OF CURVATURE, SIMPLIFICATION OF THE RADIUS MEASUREMENT, EVALUATE THE MEASUREMENT ERROR.

INTRODUCTION

Chaque année l'arbre produit un cerne de croissance, dont la largeur dépend en partie des conditions environnementales (climat, ouverture ou fermeture du milieu). Le cerne est donc un bon marqueur pour identifier les changements environnementaux mais aussi les interactions pouvant exister entre l'homme et la forêt.

Qu'il s'agisse de bois vert, de bois sec employé dans l'architecture, qu'il soit gorgé d'eau ou bien encore carbonisé, la structure anatomique du bois est relativement bien conservée. Elle permet ainsi de définir l'essence, d'étudier la vitesse de croissance, le calibre et l'âge des arbres exploités. Cependant, ces deux dernières informations peuvent être plus difficiles à appréhender en fonction des matériaux étudiés.

Dans le cadre de cette étude, seule l'estimation du calibre sera abordée en montrant plus particulièrement les différents protocoles d'estimation du rayon mis en place en fonction des types d'objets analysés. L'étude du calibre consiste à définir le diamètre du bois employé (Dufraisse 2002, 2006 ; Ludemann, 2006) en mesurant le rayon du bois c'est à dire la distance entre le cœur et l'écorce. En présence du cœur et de l'écorce sur l'échantillon, la mesure du rayon est très simple ; cependant celle-ci est rendue beaucoup plus délicate lorsque l'écorce et/ou le cœur manquent. En l'absence seulement de l'écorce, seule une mesure de calibre à minima peut être réalisée ; en revanche en l'absence du cœur, il est possible d'estimer la distance manquante entre le cœur et l'échantillon étudié.

Sur bois, l'étude se réalise généralement sur de longues séries de cernes (supérieures à 50 cernes) provenant d'un même individu ainsi l'estimation du rayon manquant permet de donner l'estimation du calibre de l'individu (même s'il s'agit d'un calibre à minima). L'analyse sur charbons de bois est beaucoup plus délicate. Les processus de carbonisation, conduisant à une fragmentation des bois, produisent en effet une multi-

tude de petits charbons (en moyenne de 4 à 6 mm). A la fragmentation s'ajoute la disparition de la majorité des fragments, s'expliquant par deux facteurs. Le premier est la perte au feu réduisant en cendres le bois lorsque la combustion est complète ; ce phénomène va conduire à la disparition d'une grande partie de l'écorce empêchant ainsi de définir directement le calibre du bois. Le second est le résultat de l'enlèvement des plus gros charbons sur le lieu de carbonisation (ce qui est le cas dans les contextes de charbonnage) (Schweingrüber, 1978 ; Thinon, 1992 ; Dufraisse, 2002, 2006 ; Chrzavzez, 2006 ; Paradis, 2007). L'estimation du calibre est donc délicate sur la fraction résiduelle. Sur charbons, cette étude nécessite deux étapes : la première consiste à évaluer la distance du charbon par rapport au cœur (c'est l'estimation du rayon de courbure). Mais cette estimation est insuffisante, car la fragmentation empêche l'étude d'une série de cernes complète. En effet, une bûche aura produit un grand nombre de fragments, décomposant ainsi le rayon total du bois mis au feu en différents rayons de courbure. Pour restituer le calibre il est nécessaire de reproduire l'estimation du rayon de courbure sur en moyenne 80 charbons par essence afin de s'assurer de la bonne représentation de tous les rayons de courbure présents dans l'échantillon (Paradis, 2007) puis de traiter l'ensemble des données par un modèle théorique permettant d'estimer les proportions de volume des bois mis au feu (Dufraisse, 2002, 2006).

Simplifier la mesure du rayon est indispensable pour rendre plus accessible l'analyse des calibres quels que soient les matériaux étudiés.

Après un bref historique des méthodes d'estimation et de mesures existantes, il sera présenté ici une application, appelée « AnthracoloJ », permettant une simplification de la mesure du rayon. Cet outil a été testé sur les différents matériaux (cibles parfaites, bois, charbons) afin de vérifier sa fiabilité et ses limites.

I - LA MESURE DU RAYON

1 - Sur bois : estimation du rayon manquant

Pour les études de dendrologie, il existe deux types de prélèvements : le débitage d'une rondelle, ou bien le prélèvement d'une carotte de bois à la tarière.

Si dans le cas des rondelles issues d'arbres vivants la série de cernes est complète, pour les objets archéologiques (poutre, pieux etc) les séries de cernes peuvent être incomplètes. En effet, certains bois peuvent avoir été travaillés, équarris, faisant ainsi disparaître la moelle et/ou l'écorce.

Lorsque les prélèvements sont réalisés à l'aide d'une tarière, il arrive souvent que le cœur ne soit pas atteint, surtout s'il est excentré ou si le tronc n'est pas rigoureusement cylindrique. En absence du cœur une estimation

de la distance manquante par rapport au cœur, appelée rayon manquant, est nécessaire (Rozas 2003 ; Norton *et al*, 1987). Pour cela il existe différentes méthodes.

Une d'elles consiste à comparer des cercles de diamètres connus imprimés sur transparent aux cernes de l'échantillon. Mais cette cible graduée ne permet qu'une estimation visuelle pouvant différer d'un opérateur à l'autre.

Afin d'avoir des résultats plus objectifs, des méthodes de mesure basées sur des règles de géométrie ont été mises en place. L'une consiste à dessiner les rayons visibles de l'échantillon sur un transparent et de les prolonger jusqu'à leur point de rencontre (Rozas, 2003 ; Figure 1a), l'autre consiste à mesurer différents paramètres sur l'échantillon (h la hauteur et L la

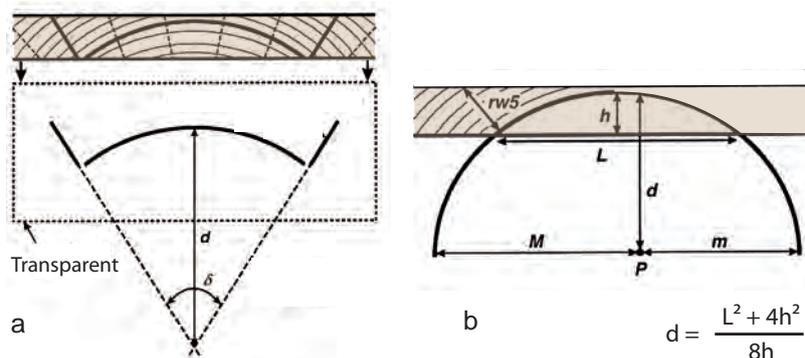


Figure 1 - Méthodes de mesure du rayon manquant (Duncan, 1989) :

a) méthode graphique de mesure par prolongation des rayons visibles (Rozas, 2003) ;

b) méthode géométrique, la mesure de la longueur L et de la hauteur h de l'arc de cercle permet de calculer le rayon manquant.

longueur de l'arc de cercle) permettant par la suite un calcul géométrique (Figure 1 b) (Duncan *et al.*, 1989).

2 - Sur charbons : la mesure du rayon de courbure

L'étude du calibre a été initiée par D. Marguerie en s'appuyant sur la courbure des cernes. Pour cette étude, trois classes ont été établies, chacune d'elles représentant une gamme de calibre (Marguerie, 1992 ; Marguerie et Hunot, 2007) :

- lorsque les cernes sont rectilignes (les rayons sont quasiment parallèles), le charbon est considéré comme provenant de la partie la plus récente de bois de gros calibres (tronc, grosses branches) ;
- lorsque les cernes présentent une courbure intermédiaire, il s'agit de la partie externe de bois de moyens calibres (branches ou petits troncs) ou bien de la partie médiane de bois de gros calibre ;
- les cernes très courbés, correspondent à des bois de petits calibres (brindilles, branchettes) ou à la partie ancienne de bois de moyens et gros calibres.

Ainsi en calculant la proportion de charbon dans chacune des trois classes de calibre il est possible de définir si les bois carbonisés étaient plutôt de petit ou de gros calibre. Cependant ces données sont des estimations visuelles dans des classes de calibres où la valeur des limites reste floue.

Afin obtenir des données quantitatives, la cible graduée est employée (Ludemann et Nelle, 2002 ;

Ludemann, 2006 ; Dufraisse, 2002, 2006). Comme pour les études dendrologiques ce procédé reste une estimation relativement subjective.

L'usage d'analyseurs d'images permet désormais de réaliser de véritables mesures en appliquant différentes techniques de mesure du rayon.

Quatre techniques ont été testées sur des cibles parfaites pour connaître la précision des résultats obtenus (Paradis, 2007 ; Paradis *et al.*, soumis).

La première est une application présente dans les analyseurs d'images, il s'agit de « l'outil cercle » (Chrzavzez, 2006). Cette méthode se base sur la courbure des cernes. En plaçant plusieurs points le long du cerne choisi, le logiciel calcule de façon automatique le diamètre du cercle correspondant. Celle-ci montre des résultats peu satisfaisants dépendant fortement de la taille de la section étudiée (Paradis, 2007 ; Paradis *et al.*, soumis).

Trois autres techniques basées sur les rayons ligneux ont été mises en place. L'une s'appuie sur le théorème de Thalès, et les deux autres appliquent les formules de trigonométrie que ce soit dans un triangle rectangle ou bien dans un triangle isocèle (Figure 2) (Paradis, 2007 ; Paradis *et al.*, soumis). Ces trois techniques présentent des résultats similaires et beaucoup plus fiables que ceux obtenus avec « l'outil cercle ». Cependant la méthode de la trigonométrie dans un triangle isocèle est plus simple à mettre en œuvre avec les analyseurs d'image employés pour cette étude. C'est pourquoi elle a été sélectionnée pour la réalisation de l'application AnthracoLoJ.

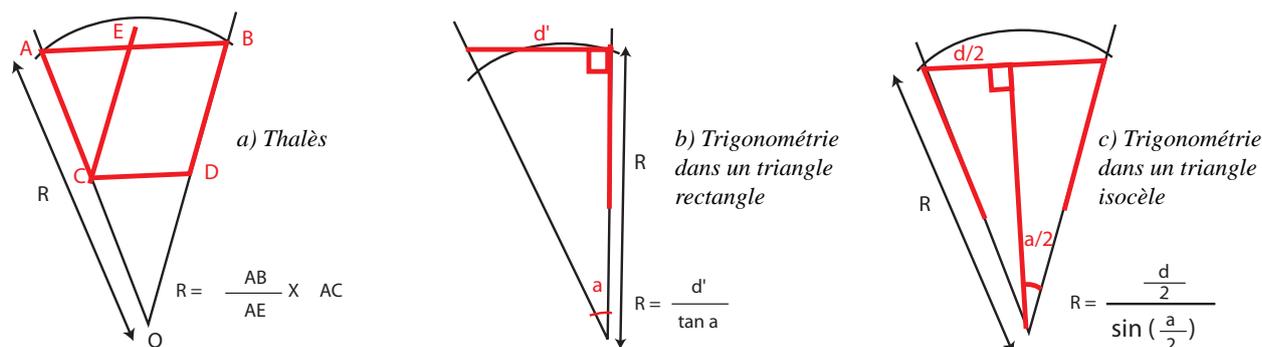


Figure 2 - Techniques de mesure du rayon de courbure (Paradis, 2007).

II - ANTHRACOLOJ, VERS UNE MISE EN ROUTINE DE LA MESURE

AnthracoloJ est une application développée par le laboratoire Géolab à partir du logiciel libre ImageJ. Cette application a pour objectif la simplification de la mesure de rayons.

1 - Capture d'image et définition de l'échelle de l'échantillon

L'application AnthracoloJ permet l'acquisition et l'enregistrement automatique d'une image pour chaque échantillon par une simple capture d'écran. A cela s'ajoute une mesure instantanée de l'échelle de l'image acquise. Pour cela il est indispensable qu'en bas de chaque image apparaisse une règle millimétrique. La mise en place d'un plugin (application informatique) « mesure de l'échelle » permet la lecture automatique des variations d'intensité lumineuse au niveau de la règle graduée. Les graduations en noir sont identifiées comme des zones de faible intensité lumineuse. Le plugin définit le nombre de pixels correspondant à une graduation déterminant ainsi l'échelle de l'image. Une fois la capture d'écran et la définition de l'échelle effectuées, la mesure du rayon est possible.

2 - Mesure du rayon

Pour réaliser la mesure, la sélection de 4 points caractéristiques suffit sur deux rayons les plus éloignés pos-

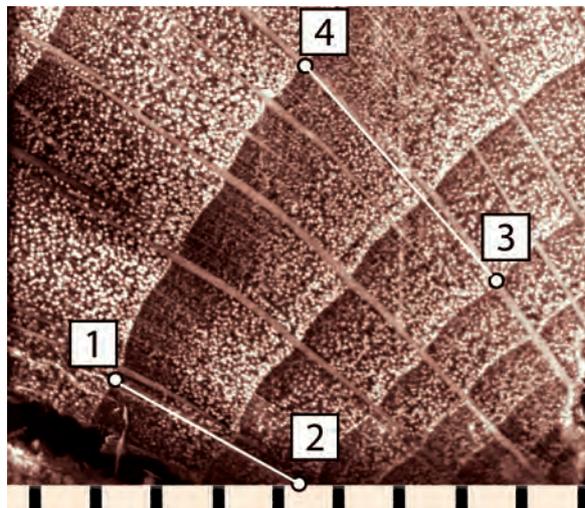


Figure 3 - Exemple de prise de mesure sur un échantillon de bois.

sible. Le premier et le dernier point sélectionnés doivent se trouver sur la même limite du cerne (Figures 2c et 3). L'application calcule ensuite automatiquement l'angle ($a/2$) et la distance entre les rayons (d) pour définir la mesure du rayon.

Afin de vérifier la cohérence des résultats, la mesure peut être répétée jusqu'à six fois sur des rayons différents. Si l'ensemble des mesures est cohérent, alors un rayon moyen est calculé. Dans le cas contraire l'échantillon est écarté de l'analyse.

III - ESTIMATION DE LA MARGE D'ERREUR

Simplifier la prise de mesure n'est pas suffisant. Il est aussi nécessaire de connaître la marge d'erreur pour chaque mesure.

1 - Protocole de validation

Dans un premier temps, pour quantifier l'erreur liée à la technique de mesure (trigonométrie dans un triangle isocèle), l'application a été testée sur des cibles parfaites (cibles graduées imprimées sur papier). Par la suite, pour évaluer l'erreur associée aux déformations du bois (excentricité des bois, déformations des rayons ligneux etc), l'application a été expérimentée sur des rondelles de bois de chêne, de hêtre et de châtaignier parfaitement poncées permettant une lecture nette des limites de cernes. Afin de ne pas travailler sur des cas trop particuliers, l'analyse a été réalisée sur des rondelles peu déformées : faible excentricité du cœur et rayons relativement rectilignes. Finalement pour connaître l'impact de la carbonisation sur la prise de mesure du rayon les

mêmes rondelles de chêne et de châtaignier ont été carbonisées dans des boîtes en terre cuite placées dans un four de potier (Tuileries de Pouligny). Les boîtes en terre cuite étant parfaitement adaptées à la taille de chaque rondelle, lors de la carbonisation le bois était maintenu, ainsi les fragments de charbons ne se sont pas déplacés. La mesure sur bois comme sur charbons a été réalisée en différents emplacements des rondelles, sur des fenêtres d'observations de deux tailles différentes (4 mm et 1 cm de côté).

Que ce soit sur cibles parfaites, sur bois ou sur charbons, pour chaque mesure réalisée le rayon réel était parfaitement connu, permettant ainsi le calcul de l'erreur associée (valeur absolue de la différence entre le rayon estimé et le rayon réel).

L'étude de l'évolution de l'erreur associée en fonction du rayon montre sur l'ensemble des échantillons analysés l'existence de relation. L'objectif de cette étude a donc été de quantifier cette erreur en fonction du rayon mesuré afin de pouvoir corriger au mieux les mesures réalisées quel que soit le type d'échantillon (bois ou charbon).

2 - Erreur liée à la technique de mesure

La technique de mesure a été testée sur 234 cibles parfaites présentant une large gamme de rayons de 1 mm à 150 mm. La représentation graphique de l'erreur associée en fonction du rayon comme présenté précédemment dans le protocole (Figure 4) permet d'observer de façon très nette l'augmentation de l'erreur associée en fonction du rayon mesuré. Cette évolution peut être simplifiée par la courbe de tendance la plus représentative : $y = 0,059 \cdot x$

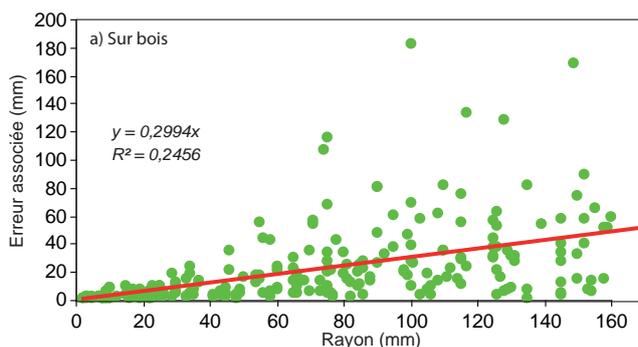
L'intensité de la relation entre l'erreur associée et le rayon est définie par le coefficient de détermination R^2 qui ici est à 21% ($p < 0,05$). L'erreur associée à la mesure ne s'explique donc qu'en partie par la taille du rayon mais cette relation doit cependant être prise en compte puisque la corrélation est significative. D'autres facteurs rentrent probablement en jeu, comme l'angle et la distance entre les rayons choisis pour la mesure. L'étude de ces paramètres est actuellement en cours (Paradis-Grenouillet, thèse en cours)

Ce modèle théorique n'est toutefois pas suffisant, il permet seulement d'évaluer l'erreur associée à l'outil « trigonométrie dans un triangle isocèle ». Il est donc nécessaire d'ajouter à cette erreur celle liée aux variations naturelles du bois.

3 - Erreur liée aux déformations naturelles du bois

Deux cents vingt quatre mesures ont été réalisées sur une gamme de rayons de 3 mm à 160 mm. En suivant le même protocole que pour les cibles parfaites, l'évolution de l'erreur associée a pu être représentée (Figure 5a). Les résultats montrent que la pente de la droite de régression est bien plus importante que celle obtenue sur les cibles parfaites. Ceci s'explique par l'ajout de l'erreur liée à la variabilité du bois à l'erreur associée à la technique de mesure. Cette fois-ci la relation entre l'erreur associée et le rayon s'élève à 24% (avec toujours $p < 0,05$).

Figure 4 (ci-contre) - Représentation graphique de l'erreur associée en fonction du rayon.



4 - Impact de la carbonisation sur la mesure du rayon

Un total de 149 sections carbonisées a été mesuré suivant le même protocole que pour les rondelles de bois. La courbe représentant l'évolution de l'erreur associée en fonction du rayon est similaire à celle obtenue sur bois (Figure 5b) avec un coefficient de détermination de 26%.

La comparaison des erreurs associées par le test de Kolmogorov Smirnov montre que l'évolution de l'erreur associée sur bois et charbon est similaire de façon significative (différence entre les distributions (D) = 0,08 et probabilité que les échantillons soient identiques (psame) = 0,58), alors que le même test montre des résultats significativement différents entre les cibles parfaites et les bois (D = 0,44 et psame = $3,46 \times 10^{-20}$)

Les similarités entre les erreurs associées obtenues sur bois et charbons de bois, mettent en évidence le faible impact de la carbonisation sur la mesure du rayon. En effet, il est rassurant de savoir que malgré les processus de carbonisation il est envisageable de mesurer la position des charbons par rapport au cœur du bois.

Compte tenu des similarités entre les résultats sur bois et sur charbons un modèle théorique de synthèse a été obtenu en combinant les données. La courbe de tendance obtenue est $y = 0,3033 \cdot x$ (avec $R^2 = 0,2519$)

Grâce à cette équation théorique il est désormais possible d'associer une marge d'erreur à chaque mesure de rayon. Par exemple, pour un rayon mesuré de 80 mm la marge d'erreur sera de plus ou moins 24,264 mm, ce qui revient à dire qu'il existe une erreur sur la mesure d'environ 30%.

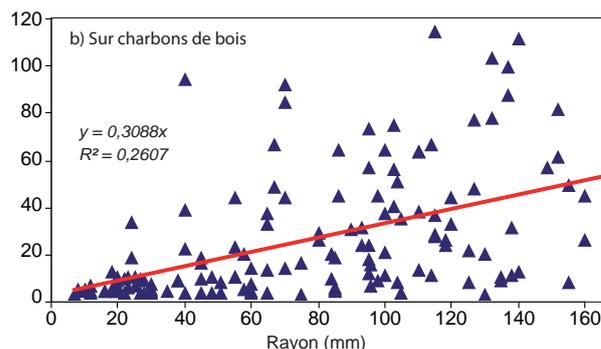
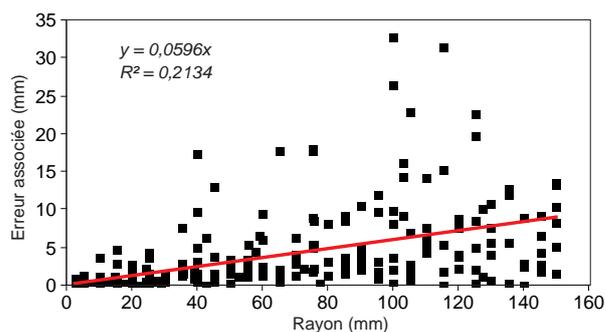


Figure 5 - Représentation graphique de l'évolution de l'erreur associée en fonction du rayon mesuré.

CONCLUSION

AnthracoloJ est une application qui a pour vocation de simplifier la mesure de rayon sur des restes de bois qu'ils soient carbonisés ou non. Grâce à cet outil la mise en routine de ce genre de mesures est envisageable. Cependant, les résultats présentés ici montrent que l'erreur associée à la mesure n'est pas uniquement liée à la taille du rayon mesuré (seul 30% de l'erreur associée est expliquée par la taille du rayon). Il est donc nécessaire de poursuivre l'analyse afin de savoir quels sont les facteurs principaux qui sont à l'origine de l'évolution de l'erreur associée. En effet, lors de la mesure trois paramètres doivent être pris en compte : l'angle entre les rayons, la distance entre les rayons ainsi que la taille du rayon. Il existe peut être des combinaisons de ces trois facteurs qui rendent la mesure fautive. En définissant de façon plus précise les limites de la méthode, c'est-à-dire angles et distances entre les rayons pour lesquels

la mesure présente des erreurs trop importantes, il sera possible d'affiner au mieux le modèle mathématique permettant de corriger les mesures réalisées (études en cours, Thèse, Paradis-Grenouillet).

Enfin, il est rassurant d'observer une similarité des résultats entre les mesures sur bois et sur charbons, car si tel n'était pas le cas, la mesure sur charbon de bois serait grandement remise en question. Cependant, il s'agit ici de carbonisations parfaitement contrôlées où les déformations ont été minimisées, mais cela était indispensable pour réaliser une mesure de rayon. Il paraît donc important de poursuivre l'étude sur d'autres charbons plus proches des contextes d'études, par exemple des charbons provenant de sites archéologiques où l'ensemble de la bûche a pu être isolée (présence au moins du cœur pour connaître la réelle position du charbon dans la bûche).

BIBLIOGRAPHIE

- CHRZAVZEZ J., 2006. Apport méthodologique et étude de cas : la grotte de Fumane dans les Pré-Alpes italiennes. Master II Environnement et Archéologie, Paris I.
- DUFRAISSE A., 2002. Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Chalain et Clairvaux (Jura, France) : collecte du bois de feu, gestion de l'espace forestier et impact sur le couvert arboréen entre 3700 et 2500 av. J.-C. Analyses anthracologiques. Thèses, Université de Franche-Comté, Besançon, 345 p.
- DUFRAISSE A., 2006. Charcoal anatomy potential, wood diameter and radial growth. In A. DUFRAISSE (éd.), Charcoal analysis : new analytical tools and methods for archaeology. Papers from the Table-Ronde held in Basel 2004, 47-59. Oxford, Archaeopress (British Archaeological Reports International Series 1483).
- DUNCAN R., 1989. An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in kahikatea (*Dracrydium dacrydioides*). *New Zealand Natural Sciences*, 16 : 31-37.
- LUDEMANN T., NELLE, O., 2002. Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei. Freiburg, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- LUDEMANN T., 2006. Anthracological analysis of recent charcoal-burning in the Black Forest, SW Germany. In Dufraisse (éd.), Charcoal analysis: new analytical tools and methods for archaeology. paper from the table ronde held in Basel 2004. Oxford, Archaeopress, 61-70.
- MARGUERIE D., 1992. Evolution de la végétation sous l'impact anthropique en Armorique du Mésolithique au Moyen Age : études palynologiques et anthracologiques des sites archéologiques et des tourbières associées. Rennes, U.P.R. n° 403 du C.N.R.S.
- MARGUERIE, D., HUNOT, J.-Y., 2007. Charcoal analysis and dendrology : data from archaeological sites in North-western France. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1417-1433.
- NORTON D.A., PALMER J.G., OGDEN J., 1987. Dendroecological studies in New Zealand. An Evaluation of tree age estimates based on increment cores. *New Zealand Journal of Botany*, 25, 373-383.
- PARADIS S., 2007. Etude dendro-anthracologique : une approche méthodologique pour l'étude des calibres de bois. Application sur des charbonnières médiévales du Mont-Lozère (France, 48). Master Pro Archéosciences, Université de Dijon.
- PARADIS S., DUFRAISSE A., ALLÉE P., Soumis. Wood radius curvature measurements and wood diameter: comparison of different image analysis techniques. 4th international meeting of anthracologie. 8-13 September 2008, Brussels.
- ROZAS V., 2003. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods. *Plant Ecology*, 167, 193-212.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1978. Anatomie microscopique du bois. Zuercher : Institut fédéral de recherche forestière.
- THINON M., 1992. L'analyse pédoanthracologique : aspects méthodologiques et applications. Aix Marseille 3, 317 p.

DENDROCHRONOLOGIE ET DENDROCLIMATOLOGIE DU CHÊNE EN FRANCE

QUESTIONS POSÉES PAR LE TRANSFERT DE DONNÉES DE BOIS HISTORIQUES VERS LA DENDROCLIMATOLOGIE

*DENDROCHRONOLOGY AND DENDROCLIMATOLOGY OF OAK IN FRANCE
QUESTIONS BEFORE USING HISTORICAL WOODS IN DENDROCLIMATOLOGY*

GEORGES LAMBERT¹, VINCENT BERNARD², JEAN-LUC DUPOUEY³, PASCALE FRAITURE⁴,
PATRICK GASSMANN⁵, OLIVIER GIRARD CLOS¹, FRANÇOIS LEBOURGEOIS⁶,
YANNICK LEDIGOL⁷, CHRISTOPHE PERRAULT⁸, WILLY TEGEL⁹

¹ Laboratoire de Chrono-Environnement, CNRS, université de Franche-Comté, Besançon, F.

² Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire, CNRS, université de Rennes-1, Rennes, F.

³ UMR Ecologie et Ecophysiologie forestières, INRA, Champenoux, F.

⁴ KIK-IRPA, Bruxelles, B.

⁷ DENDROtech, Univ. Rennes-1, Rennes, F.

⁵ Musée Le Laténium, Hauterive, CH.

⁸ CEDRE, Besançon, F.

⁶ LERFoB, INRA, Champenoux, F.

⁹ Dendronet, Böhlingen, D.

Contact : joellamb@club-internet.fr

RÉSUMÉ

Le processus de datation dendrochronologique implique un mélange de postulats historiques, archéologiques et mathématiques. La marge d'erreur tolérée des dates livrées doit être adaptée à l'usage qu'il en est fait, la date dendrochronologique pouvant être aussi bien une indication accessoire à un discours qu'un élément clé d'une démonstration. L'erreur acceptable n'est pas la même dans le rapport monographique d'un monument que dans l'évaluation d'une construction de plusieurs milliers de bois issus d'une vaste zone – la moitié nord de la France et ses marges de basse altitude. L'exigence de transparence de l'erreur est plus grande. Dans la perspective de tenter une reconstruction climatique du 2^e millénaire de notre ère (programme ANR ESCARSEL) à partir du chêne, dans la zone en question, nous avons mis au point un calcul qui filtre les séries datées en tenant compte de la nature de la méthode qui les a datés en amont.

MOTS-CLÉS : CHÊNE, DATATION, DENDROCHRONOLOGIE, EMPIRISME, ERREUR, STATISTIQUES.

ABSTRACT

The dating process needs a set of historical, archaeological and mathematical postulations. The accepted error must be adapted to the aim : the way the dates will be used by other specialists, a date being either an accessory in a large speech or an essential node in a demonstration. The error effect is different in a local analyse, i.e. about a building, and in a research concerning thousands of wood pieces of a large area, which in it is necessary to know better the nature of the error. In the aim to rebuild the climate of the last millenary from trees of Northern France and low lands near the frontiers (ESCARSEL program), we are proposing a way to sort dendrochronological results coming from archaeology and history respecting the way they were build.

KEYWORDS : DATING, DENDROCHRONOLOGY, EMPIRICISM, ERROR, OAK, STATISTICS.

INTRODUCTION

La dendrochronologie est une discipline qui sert à dater (chronos) des arbres (dendron), donc du bois (xylos). Dans une région donnée, le facteur climatique qui affecte de façon synchrone, année après année, les propriétés des cernes de croissance des arbres est le fil conducteur du processus de datation. Ici, nous traiterons de la largeur du cerne du chêne rythmée par le climat. Le principe de la datation par la largeur des cernes, basé sur la comparaison des rythmes de croissance est simple (Figure 1, en haut), mais sa mise en œuvre pose de nombreux problèmes car plusieurs facteurs compliquent la comparaison. Enumérons brièvement :

- le facteur de sénescence et le facteur géométrique qui tendent à réduire la largeur du cerne à mesure qu'il vieillit ;
- le facteur stationnel qui offre les ressources du sous-sol, en particulier l'eau et qui varie d'un lieu à un autre ;
- le facteur de compétition qui rend l'arbre dépendant de la vitalité de ses voisins ;
- le facteur anthropique induit par l'activité de l'homme sur l'arbre vivant et autour de lui, ce dernier facteur ayant, au cours du temps et dans un même lieu, un caractère plus aléatoire que les précédents (Figure 1, en bas).

Ces facteurs demandent à être identifiés et corrigés au mieux, l'idéal étant de les corriger séparément.

Cette correction sélective est complexe et donne lieu à de nombreux échanges scientifiques et à une abondante littérature (Eckstein 1969 ; Baillie et Pilcher, 1973 ; Fritts, 1976 ; Shiyatov *et al.*, 1989 ; Lambert et Lavier, 1991 ; Dupouey *et al.*, 1992 ; Girardclos, 1999 ; Esper

et al., 2003 ; Durost, 2005 ; Guiot *et al.*, 2005 ; Lambert, 2006). Elle est moins malaisée à conduire dans l'étude d'arbres sur pied dont on connaît l'environnement que sur des bois anciens tirés d'arbres dont l'origine est rarement connue. Cette complexité affecte considérablement les techniques de corrélation qui demandent des corrections préalables. La diversité des réponses engage aussi une variabilité du point de vue sur l'erreur.

Dans cet article, nous présentons une méthode de correction spécialement adaptée à la datation, basée sur le comportement global de la croissance d'un individu, l'aspect de son graphique de croissance, appelée méthode du Corridor (Figure 2 ; Lambert 2006). La correction vise à réduire au maximum l'effet géométrique de la sénescence, de la compétition et de la station. La réduction de l'effet géométrique de la sénescence et de la compétition est obtenue par la rectification de la tendance de la croissance, normalement dégressive. Cette tendance, considérée *a priori* comme curvilinéaire, est d'abord évaluée sous la forme d'un polynôme (par exemple $y = a.x^3 + b.x^2 + c.x$, y =valeur de la tendance, x =année), puis chaque largeur de cerne est corrigée pour que la tendance résultante soit une droite horizontale dont l'équation est $y=0$ (centrage point par point). Dans une troisième étape, les données obtenues sont à nouveau modifiées afin que l'amplitude maximum de chaque graphe soit constante et identique pour toutes les séries (réduction). On corrige ainsi l'effet stationnel. Dans le discours qui va suivre on considérera que le biais causé par cette correction, comparée aux données d'origine – les largeurs – est un bénéfice et donc qu'il n'implique pas d'erreur.

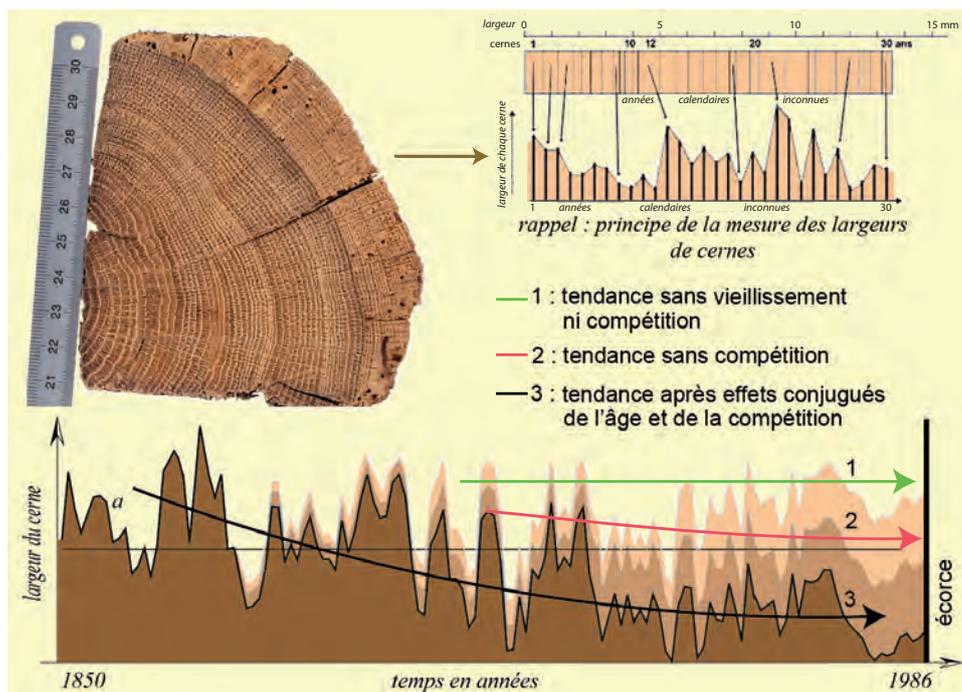


Figure 1 - Chemin de mesures tracé sur un échantillon de chêne et dynamique naturelle de la croissance d'un arbre. La tendance de la croissance à diminuer doit être corrigée pour permettre des comparaisons d'arbres de provenances et d'âges différents.

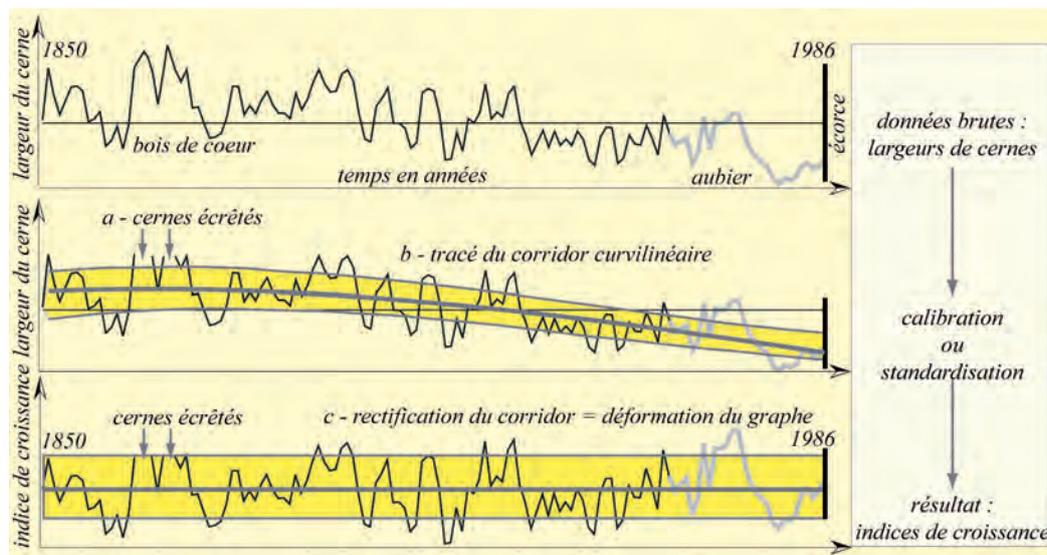


Figure 2 - Principe de la correction des largeurs brutes par la méthode du corridor. Les largeurs brutes sont impropres au calcul, elles doivent être « normalisées ». Différentes corrections existent, variables selon les objectifs.

I - LA FIABILITÉ DE LA DATATION

Les données corrigées sont soumises aux calculs de corrélation qui comparent des chronologies non datées à d'autres datées. Ces calculs mesurent le taux de confiance des synchronismes proposés. Le taux de confiance permet de distinguer trois *classes* de résultats : des dates acquises avec un taux de confiance élevé, des dates possibles dont le taux de confiance pose question et des dates impossibles car le taux de confiance est trop faible. Toute la question du choix se trouve alors concentrée sur la sélection des dates possibles : lesquelles conserver, lesquelles rejeter. L'important développement de la datation l'histoire et l'archéologie des 50 dernières années en Europe montre que la technique qui consisterait à rejeter globalement le groupe des dates mathématiquement possibles serait stérilisant et laisserait dans l'ombre les découvertes les plus séduisantes que peut apporter la dendrochronologie à l'histoire de l'art et à l'histoire du bâti (Lambert *et al.*, 2008).

Bien que basée mathématiquement, largement statistique au départ (Fritts, 1976), la dendrochronologie, *sensu stricto*, s'est donc progressivement enrichie, en Europe en tous cas, de techniques d'appoint plus littéraires qui activent des hypothèses historiques, stylistiques ou typologiques. Ces hypothèses introduisent des probabilités non mesurables dans l'enchaînement des déductions (Hollstein, 1980 ; Lambert 2010). Il s'ensuit que les décisions qui aboutissent aux constructions chronologiques – ou *chronologies* – des *dendroarchéologues* associent dans un même raisonnement du calcul (Girardclos, 1999 ; Fraiture 2007 ; Durost, 2005 ; Lambert, 2006) et des considérations historiques (Gassmann, 1984 ; Hoffsummer, 1995 ; Bernard, 1998 ; Gassmann *et al.*, 2006 ; Houbrechts, 2008 ; Guibal et Pomey, 2008 ; Tegel *et al.*, 2008). A la différence du calcul probabiliste qui délivre un seuil de décision chiffré, la vraisemblance historique

ou archéologique met en œuvre des recoupements complexes propres aux disciplines concernées et non chiffrables.

La datation historique et archéologique est une activité interdisciplinaire qui a fait ses preuves après 50 ans de pratique. Bien que des zones d'ombre demeurent dans la logique du doute de certains résultats – c'est là que se concentre notre questionnement –, le dendrochronologue historien propose des systèmes chronologiques locaux ou régionaux fonctionnels. Dans ces systèmes, empiriquement fondés dans de vastes régions et de longues périodes, le calcul probabiliste prend une part variable dans la décision.

Cette démarche mixte s'est imposée progressivement et apparaît aujourd'hui comme largement légitime car elle produit, *in fine*, des blocs chronologiques dont la part d'erreur globale est manifestement faible à défaut d'être précisément calculable. La fiabilité de ces blocs peut être présentée sous forme de graphiques de synchronisation superposés, de réseaux de relations ou de *matrices de corrélations croisées* ou *matrices d'inter-corrélations* qui résument les corrélations d'un lot de chronologies (Figure 3). Une *matrice* décrit une liste de corrélations croisées comme un réseau, un graphe mathématique, dont les nœuds sont les chronologies et les arcs les corrélations. Les corrélations sont exprimées de diverses façons (voir plus loin). Zones de certitude et zones de doute sont alors visibles et séparées sur un même graphique. Dans le type de graphique que nous utilisons, le doute s'exprime en bas et à droite de la matrice (Figure 4). Le calcul de rangement des matrices qui accorde la priorité aux meilleurs résultats, est spécifique. Mais le « doute » ou l'insuffisance de preuves n'est pas la « marge d'erreur » qui s'exprime par un nombre entre 0 et 1. L'exercice va donc consister à trouver une méthode de traitement de ces matrices de façon à ce que la marge d'erreur induite soit mesurable.

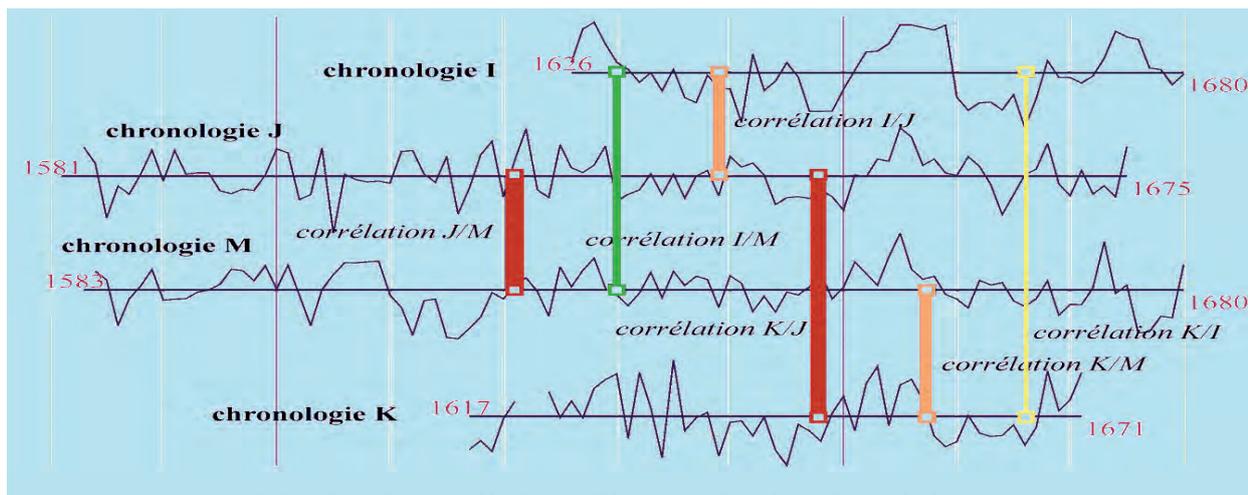


Figure 3 - Exemple de quatre chronologies synchronisées.

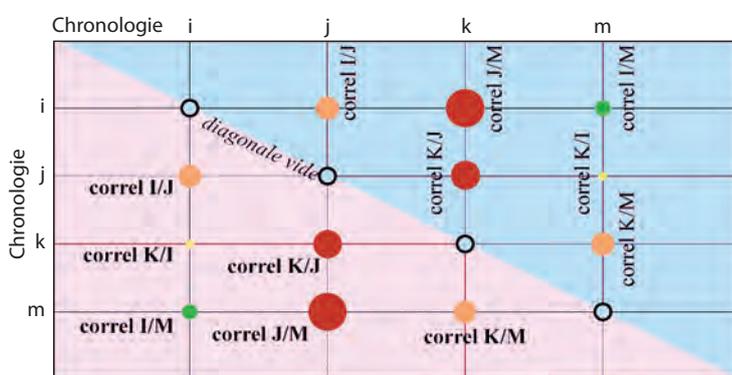


Figure 4 - Matrice de corrélations de 94 individus (chêne) de la station lacustre de Charavines (38). Les bois ont été rangés dans l'ordre décroissant des corrélations par un algorithme spécifique (période de 874AD-1025AD).

II - DE LA DATATION AUX INTERPRÉTATIONS CLIMATIQUES

Fondée sur l'analyse d'arbres vivants, dûment localisés sur le lieu de leur développement, la dendroclimatologie écarte la notion d'erreur au départ. Elle n'inclut pas l'hypothèse du doute dans le synchronisme des séries dendrochronologiques mises en jeu. Le raisonnement probabiliste – donc complètement chiffré – est le principe de base de l'évaluation des estimateurs dendroclimatiques, que ces estimateurs visent à *reconstruire* des climats passés ou à *prédire* des climats futurs (Cook *et al.*, 1994 ; Guiot *et al.*, 2000 ; Beniston, 2002 ; Guiot *et al.*, 2005 ; Lebourgeois, 2006 ; Jones *et al.*, 2008 ; Lebourgeois *et al.*, 2010). Le dateur qui veut collaborer aux recherches sur le climat doit alors livrer des constructions – des *chronologies* – dont la datation

est dépourvue d'erreur ou, au moins, frappée, d'une erreur négligeable.

Une remarque de départ va nous conduire à nous écarter des chemins connus : le praticien, le dateur, passe une grande partie de son activité à tenter de maîtriser les corrélations litigieuses comme si le calcul ne lui livrait pas la « vraie » marge d'erreur. Ce faisant, il malmène les statistiques qui sont néanmoins son outil quotidien. Cette pratique nous a interpellé car si le calcul ne donne pas la vraie marge d'erreur dans les cas litigieux, pourquoi la donnerait-il dans les autres cas ? Un travail s'est donc imposé : vérifier la performance des filtrages pratiqués avec les calculs standard en appliquant ces calculs à des bois datés avec certitude : des arbres sur pied.

III - OBJECTIF ET MATÉRIAUX, BASES DU CALCUL

Le travail, typiquement expérimental, a été conduit sur plus d'un millier de chênes actuels de la zone française tempérée (basse altitude), carottés sur pied ou prélevés sur bille, manipulés comme si leur date était inconnue. Nous avons rassemblé les données de neuf laboratoires concernant le dernier millénaire :

- le laboratoire de Chrono-Environnement du

CNRS (Université de Franche-Comté, Besançon), instigateur de l'opération ;

- le Musée LATENIUM de Neuchâtel (Hauterive, CH) qui fournit des bois sur le versant suisse du Jura ;
- l'entreprise de dendrochronologie CEDRE de Besançon qui documente le Centre et l'Est de la France ;

- deux laboratoires de l'INRA (Champenoux et universités de Paris et Nancy) qui ont mis à disposition la base de données du programme RENECOFOR ;
- le laboratoire CREAAH du CNRS (université de Rennes I), spécialisé sur les interprétations paléo- et archéologiques ;
- l'entreprise DENDROTECH de Rennes plutôt axée sur l'Ouest et le centre-nord de la France ;
- l'unité WSL de Zürich (CH) associé à l'entreprise DENDRONET (Böhligen et Feiburg-in-Brigau, D), active sur le nord-est de la France ;
- Mme Yvonne Trenard qui bâtit une première base de données française au Centre Technique du Bois (CTB, Paris) dans les années 1975-2000.

L'objectif étant de tirer des calculs de « datation » la proportion des dates exactes trouvées comparée à celle des dates non trouvées et à celle des dates « fausses » proposées comme plus plausibles que des dates vraies. Ceci conduit à calculer trois indicateurs :

- la part f des dates exactes livrées par chaque niveau de filtrage dans le lot des résultats sélectionnés par lui. La proportion f donne la *fréquence* des bonnes réponses ;
- la part complémentaire $err(f)$ des dates fausses proposées par le même niveau de filtrage. Elle se calcule simplement par $err(f) = 1 - f$, c'est l'*erreur* associée à f ;
- la part f/T des dates exactes non trouvées comparée au nombre total de dates attendues. C'est la *performance* du niveau de filtrage utilisé.

1 - Propriétés générales du calcul

C'est 1270 arbres qui ont été collectés dans la moitié nord de la France et en Suisse occidentale, soit environ 250 à 300 000 km² (Figure 5). Ce qui donne à peu

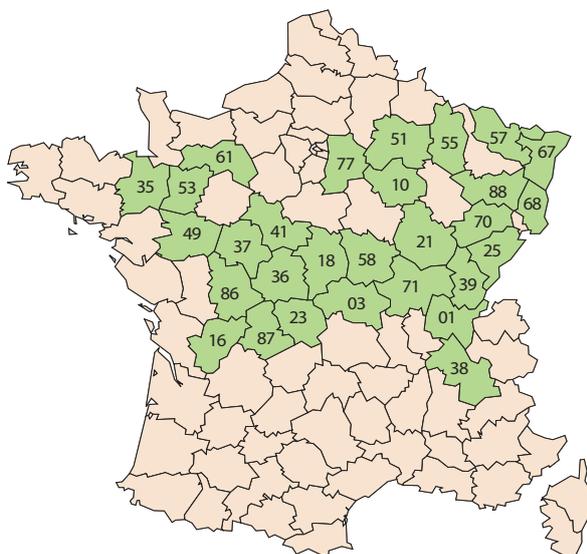


Figure 5 - Les départements en vert constituent la zone d'étude des 1270 chênes sur pied prélevés entre 1975 et 2000.

près une ellipse centrée entre les villes de Nevers et Auxerre, de rayons maximum et minimum respectifs de 600 km (E-W) et 400 km (N-S) et représente le terrain d'exploration ordinaire d'un dateur qui travaille dans cette zone. Les séries individuelles ont été rassemblées dans une seule base de données et normalisées (standardisées) par la méthode du *Corridor*. Ces 1270 bois ont été groupés en 52 sites distincts pour lesquels une *chronologie standardisée* (moyenne) a été calculée. Les calculs porteront sur la synchronisation des 52 chronologies de site. La période principalement concernée est la phase 1840 -1995 bien que certaines chronologies commencent dès le XVII^e siècle. Tous les synchronismes (les « dates ») possibles de chaque chronologie sur les 51 autres ont été calculés, chaque chronologie fonctionnant comme dateuse de toutes les autres. Le chevauchement moyen est de 118 ans. L'outil mathématique utilisé pour apprécier la qualité des synchronismes est le coefficient de corrélation r , et le procédé de validation le test t de Student, calculé à partir de ce coefficient (Figure 6) et surtout la probabilité $p(t)$ qu'il permet de calculer. La légitimité du test de Student dans les datations a été expliquée dans de nombreux papiers depuis les années 1930 aux Etats-Unis et en particulier dans le livre de Harold C. Fritts (Fritts, 1976). Il fut introduit pour la première fois en Europe, pour une datation dendrochronologique, par une équipe de Belfast (Baillie et Pilcher, 1973).

Les conditions générales des calculs sont les suivantes : la longueur moyenne des chronologies est de 156 ans (soit 155 intervalles interannuels) ; la longueur moyenne des chevauchements entre paires comparées de 118 ans ; pour rester dans les conditions de la pratique ordinaire, le chevauchement a été maintenu variable et limité à un minimum de 60 cernes. Il a donc

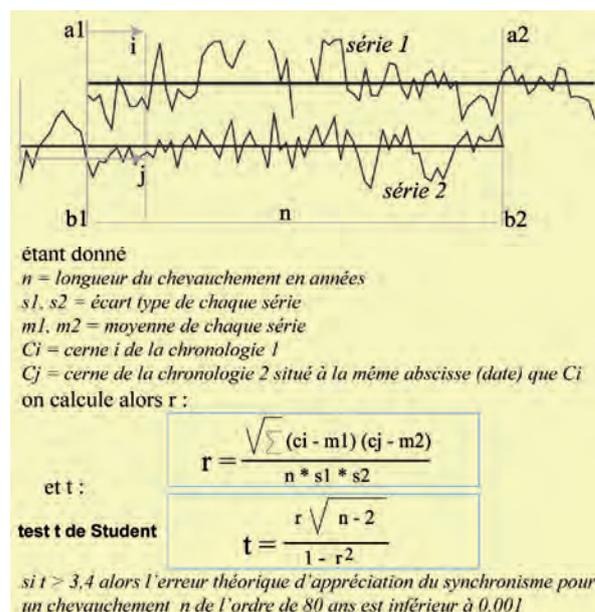


Figure 6 - Formules du coefficient de corrélation r (dit quelquefois de Spearman) et du test t de Student.

été tenté en moyenne pour chaque chronologie comparée à une autre : $155 - 60 = 95$ dates, dont une seule est vraie.

Soit $((52 \times 52) - 52) / 2 \times 95 = 125970$ calculs réalisés au total, parmi lesquels seulement $((52 \times 52) - 52) / 2 = 1326$ correspondent à une « date » exacte.

Nous utiliserons l'expression « date d'une chronologie » en raccourci, la « date » étant en fait celle de la dernière année, du dernier cerne, de la chronologie (la plus récente).

2 - Approche initiale du résultat

Dans une première phase les résultats les plus médiocres, ceux dont le coefficient de corrélation r est inférieur 0,1 sont éliminés. Ce premier tri écarte environ 55% des résultats non significatifs. Ce qui n'exclut pas que dans le lot des résultats écartés il y ait des dates « vraies » (et il y en a quelques unes). Les 45% de résultats restant concernent néanmoins 69 000

calculs, soit près de 50 fois le nombre de résultats exacts attendus.

Un deuxième tri est alors opéré, paire par paire. Ce tri utilise un seuil variable : il ne garde que les cinq meilleurs résultats, exprimés en probabilités $p(t)$ du t de Student. La corrélation seuil conservée, la moins bonne des cinq, varie donc d'une paire à l'autre. Ce qui donne un tableau contenant au maximum $((52 \times 52) - 52) / 2 \times 5 = 6630$ résultats, parmi lesquels nous espérons trouver les 1326 dates exactes.

Dans ce cas précis, 3844 résultats sont restés (pour lesquels le filtrage a combiné $r > 0,1$ et $\text{rang} \leq 5$), dont 1005 sont exacts. Les trois propriétés fréquence f (des résultats exacts), erreur associée $\text{err}(f)$ et performance f/T ont été calculés pour 11 niveaux de filtrage de la probabilité du t de Student allant de 99,5% à 99,99% de sécurité.

A ce stade, la liste des résultats paire à paire, vidée de ses corrélations $\leq 0,1$ et des synchronismes classés en dessous du rang 5 du Student t présente les propriétés suivantes : performance $f/T = 76\%$ (0,76), fréquence $f = 26\%$ (0,26) ; erreur $\text{err}(f) = 74\%$ (0,74).

IV - PROBABILITÉS DES T DE STUDENT CONSIDÉRÉS ISOLÉMENT

La valeur t du test de Student suit une loi de probabilité. Cette probabilité peut être utilisée directement ou inversement (Snedecor et Cochran, 1937 ; Dagnélie, 1973-1975) selon que l'on cherche à prédire la fréquence ou la rareté d'un phénomène. Ici, 125970 calculs ont été effectués, on devrait donc s'attendre à ce que la fréquence des résultats tende vers leur probabilité. L'outil d'évaluation est donc la fréquence, le rapport de dates justes et fausses proposées à un niveau de filtrage donné.

Les niveaux de filtrage analysés sont, du plus tolérant au plus exigeant : $p(t) = 0,9950$; $0,9960$; $0,9970$; $0,9980$; $0,9990$ et 1 (erreurs = 0,5 ; 0,4 ; 0,3 ; 0,2 ; 0,1 et 0,0%), et $0,9992$; $0,9994$; $0,9996$; $0,9998$ et $0,9999$ (erreurs = 0,08 ; 0,06 ; 0,04 ; 0,02 et 0,01%).

Dans les formules du tableau ci-contre à droite le nombre maximum de dates exactes à trouver, M , n'a pas changé : $M = 1326$.

La fréquence expérimentale montre une erreur marginale dix fois supérieure à celle, théorique, du t de Student au voisinage du risque de 0,3% - 0,1% (1 à 3 pour mille). Nous avons déjà évoqué cet écart sous l'angle de l'écart brut des valeurs de t , dans un article à paraître (Lambert, 2010). La correspondance entre la série des $p(t)$ délivrées par le calcul habituel et la fréquence observée (Figure 7) permet de tracer un graphique à onze points par lesquels peut passer une courbe lissée. Cette courbe lissée permet de tirer un tableau de correspondance entre la probabilité proposée $p(t)$ et une fréquence expérimentale (et non plus observée) plus généralisée qui est à droite de la figure.

| Résultats | performance d * 100 / M | fréquence d * 100 / T | erreur |
|--|----------------------------|--------------------------|--------|
| 1 : t (p = 0,9950) T = 1359 résultats dont d = 787 dates exactes | 59,4% | 57,9% (0,579) | 42% |
| 2 : t (p = 0,9960) T = 1359 résultats dont d = 787 dates exactes | 55,1% | 64,7% (0,647) | 35,3% |
| 3 : t (p = 0,9970) T = 1359 résultats dont d = 787 dates exactes | 50,5% | 69,9% (0,699) | 30,1% |
| 4 : t (p = 0,9980) T = 812 résultats dont d = 619 dates exactes | 46,7% | 76,2% (0,762) | 23,8% |
| 5 : t (p = 0,9990) T = 698 résultats dont d = 571 dates exactes | 43,1% | 81,8% (0,818) | 18,2% |
| 6 : t (p = 0,9992) T = 635 résultats dont d = 543 dates exactes | 41% | 85,5% (0,855) | 14,5% |
| 7 : t (p = 0,9994) T = 606 résultats dont d = 519 dates exactes | 39,1% | 85,6% (0,856) | 14,4% |
| 8 : t (p = 0,9996) T = 524 résultats dont d = 476 dates exactes | 35,9% | 90,8% (0,908) | 9,2% |
| 9 : t (p = 0,9998) T = 352 résultats dont d = 341 dates exactes | 25,7% | 96,9% (0,969) | 3,1% |
| 10 : t (p = 0,9999) T = 306 résultats dont d = 303 dates exactes | 22,9% | 99% (0,990) | 1% |
| 11 : t (p = 1,0) T = 131 résultats dont d = 130 dates exactes | 9,80% | 99,2% (0,992) | 0,8% |

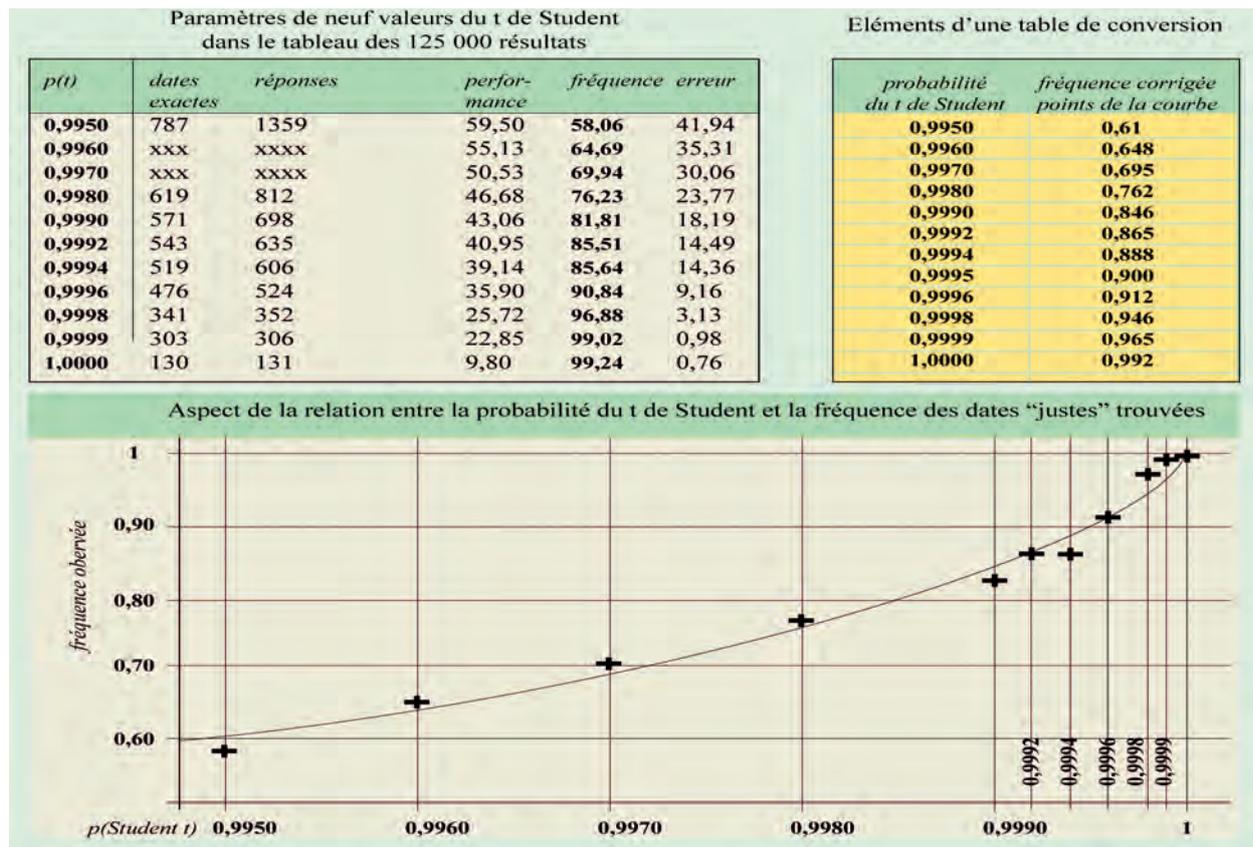


Figure 7 - Le test de Student est utilisé pour son aptitude à donner la probabilité d'un phénomène. Les calculs effectués dans cet exercice montrent clairement que les conditions d'application de ce test ne sont pas réalisées et que les probabilités résultantes sont biaisées.

V - RECOUPEMENTS DES DATES (RÉPLICATION) ET PROBABILITÉS RÉSULTANTES

La pertinence d'une date proposée par un calcul isolé est renforcée quand ce résultat est confirmé par d'autres (qui donnent la même date). Dans un processus qui cherche à dater une chronologie par un groupe d'autres, le nombre de résultats qui donnent la même date est appelé *réplication* de la date, la *réplication* est donc de 2, 3, n fois. Nous posons que chaque résultat d'une *réplication* peut être considéré comme un tirage au sort indépendant des autres. Sous cette hypothèse, la marge d'erreur d'un résultat combiné peut être approchée par le produit des erreurs qui le composent, c'est l'hypothèse de l'indépendance des tests. Le principe est le suivant : supposons 4 chronologies indépendantes (c'est-à-dire n'ayant aucun composant en commun) : trois chronologies I, J et M datées, contemporaines et inter-corrélées, et une chronologie K à dater au moyen de I, J, M. Les corrélations précises entre K et I, J et M constituant un sous-ensemble des résultats d'un calcul plus large collectés dans une *matrice de corrélations croisées* ou *matrice d'inter-corrélations* (Figure 8). L'hypothèse d'indépendance autorise alors à définir le risque d'erreur résultante par le produit des risques « singuliers » liés à chaque résultat.

Par exemple, si, pour une « date » donnée de la chronologie K :

- la chronologie I livre un résultat avec un risque d'erreur singulier de 0,03 (3%) ;
- la chronologie J livre un résultat avec un risque singulier de 0,01 (1%) ;
- la chronologie M livre un résultat avec un risque singulier de 0,02 (2%),

alors nous sommes en droit de supposer que la simultanéité des trois résultats présente un risque d'erreur de $0,03 \times 0,01 \times 0,02 = 0,00006$ (0,006% = 6 pour cent mille) ; résultat collectif qui est le produit des résultats individuels. Dans la matrice, ce calcul concerne une ligne entière ou une colonne entière. Dans l'attente d'une démonstration ultérieure nécessaire, l'erreur sera péjorée d'un facteur destiné à absorber l'erreur moyenne environnementale, c'est-à-dire l'erreur latente dans les autres lignes ou colonnes de la matrice. On posera que cette erreur croît avec la racine carrée de la réplication, c'est-à-dire du nombre d'éléments mis en jeu dans le calcul de l'erreur. Ici, la réplication étant 3, l'erreur effectivement considérée sera $0,00006 \times 3^{1/2} = 0,000104$. Ce facteur de péjoration est ramené à 1 à partir du moment où sa fonction d'augmentation de l'erreur n'est plus assumée.

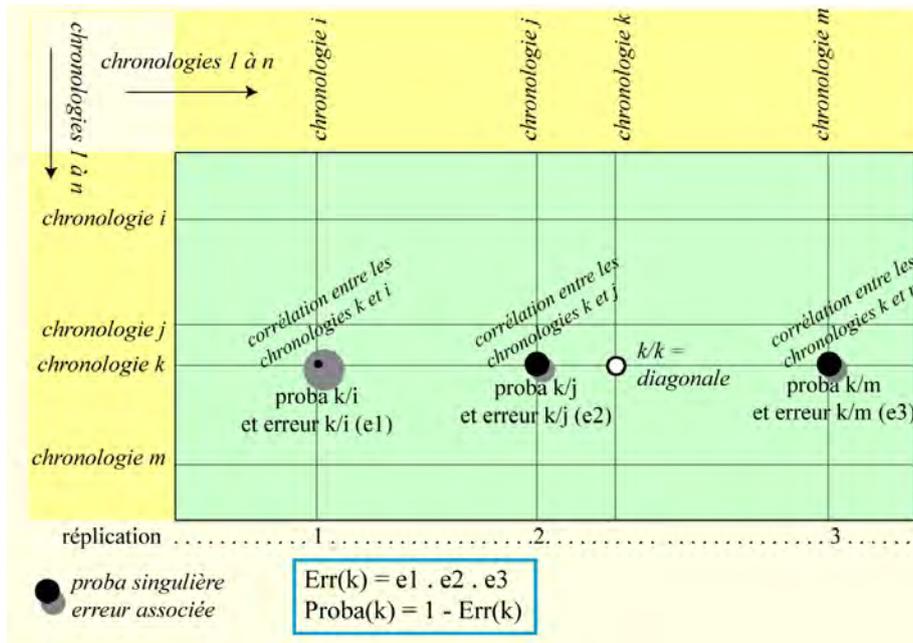


Figure 8 - Les corrélations croisées sont la base de la décision en datation dendrochronologique. La convergence de plusieurs calculs vers une date donnée est plus crédible qu'un calcul isolé. On peut approcher l'amélioration de la crédibilité en utilisant le produit des erreurs liées dans une ligne ou une colonne.

L'application de cette loi d'indépendance des tests aménagée aux résultats singuliers précédents pour les réplifications monotones 2 à 12 d'un même niveau de réponse donne un tableau qui fixe les ordres de grandeurs de l'erreur combinée résultante (Figure 9).

La ligne 1 du tableau doit être discutée séparément. Elle montre qu'en partant d'une erreur singulière trop importante, la réplification n'améliore plus le score à partir de 6 fois. Le procédé atteint ici une de ses limites. Mais nous savons qu'il ne sert à rien de multiplier les scores trop faibles car un résultat est rarement accepté en l'absence d'un ou deux « bons » résultats dans la

chaîne. En pratique, le cas théorique de la ligne 1 du tableau est d'emblée écarté.

Il n'empêche que, dans ses conditions normales ce calcul fait d'abord progresser rapidement le score vers une probabilité élevée. Ainsi le médiocre départ avec $p(t) \geq 0,995$, soit 61% expérimentaux (première ligne), atteint les 90% (90,6) en 6 réplifications. Comparé aux propositions du calcul brut de Student, on note aussi que lorsque celui-ci annonce une erreur quasi nulle (0,9999), ramenée par nous à 0,992, il faut tout de même une réplification de 3 résultats de ce type pour franchir réellement le cap de la sécurité supposée d'un seul t.

Globalement, ces résultats nous paraissent plausibles et plus fonctionnels que la simple probabilité de t bien que celle-ci fonctionne avec évidence en toile de fond, en décalage en quelque sorte. La « dégradation » apparente des probabilités trouvées est liée en grande partie au filtrage qui fait, qu'en ne considérant qu'une sous-population des résultats (les meilleurs ou les moins mauvais), nous faisons monter l'exigence. Le rôle du filtrage sur les nombres calculés est important car il retire des calculs tous les recouvrements frappés d'une corrélation trop faible. Il y a donc une limite imposée au calcul infini des combinaisons due au filtrage de départ.

| base p(t) | erreur corrigée | fréquence corrigée | p(réplifications) | | | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 0,9950 | 0,39 | 0,61 | 0,78 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,906 | |
| 0,9960 | 0,352 | 0,648 | 0,82 | 0,89 | 0,925 | 0,941 | 0,949 | |
| 0,9970 | 0,305 | 0,695 | 0,87 | 0,93 | 0,958 | 0,971 | 0,978 | |
| 0,9980 | 0,238 | 0,762 | 0,92 | 0,967 | 0,984 | 0,992 | 0,995 | |
| 0,9990 | 0,154 | 0,846 | 0,97 | 0,991 | 0,997 | 0,999 | 0,9996 | |
| 0,9992 | 0,135 | 0,865 | 0,974 | 0,994 | 0,998 | 0,9995 | 0,9998 | |
| 0,9994 | 0,112 | 0,888 | 0,982 | 0,9966 | 0,9992 | 0,9998 | 0,99995 | |
| 0,9995 | 0,1 | 0,9 | 0,986 | 0,9976 | 0,9995 | 0,99989 | 0,99997 | |
| 0,9996 | 0,088 | 0,912 | 0,989 | 0,9983 | 0,9997 | 0,99994 | 0,99999 | |
| 0,9997 | 0,071 | 0,929 | 0,993 | 0,9991 | 0,9999 | 0,99998 | 1 | |
| 0,9998 | 0,054 | 0,946 | 0,996 | 0,99961 | 0,99996 | 0,99999 | 1 | |
| 0,9999 | 0,035 | 0,965 | 0,998 | 0,99989 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 0,008 | 0,992 | 0,9999 | 1 | 1 | 1 | 1 | |

| base p(t) | erreur corrigée | fréquence corrigée | p(réplifications), suite | | | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 0,9950 | 0,61 | 0,39 | 0,903 | 0,893 | 0,874 | 0,845 | 0,799 | 0,729 |
| 0,9960 | 0,648 | 0,352 | 0,952 | 0,953 | 0,950 | 0,944 | 0,935 | 0,921 |
| 0,9970 | 0,695 | 0,305 | 0,983 | 0,985 | 0,986 | 0,987 | 0,987 | 0,986 |
| 0,9980 | 0,762 | 0,238 | 0,9969 | 0,9979 | 0,9985 | 0,9989 | 0,9991 | 0,9993 |
| 0,9990 | 0,846 | 0,154 | 0,9999 | 0,99994 | 0,99997 | 0,99999 | 0,99999 | 1 |
| 0,9992 | 0,865 | 0,135 | 0,99994 | 0,99998 | 0,99999 | 1 | 1 | 1 |
| 0,9994 | 0,888 | 0,112 | 0,99998 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0,9995 | 0,9 | 0,1 | 0,99999 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0,9996 | 0,912 | 0,088 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

P(t) : probabilité proposée par le test t de Student
 f : fréquence corrigée des dates "justes"
 err(f) : erreur sur f : err(f) = 1 - f

2, 3, 4... : réplification du résultat f
 p(réplification) : sécurité attendue pour la réplification

Figure 9 - Table de conversion des sécurités de réplifications simples (réplification de résultats de même type) en combinant les tests successifs. Calculs de la réplification du même niveau de résultat.

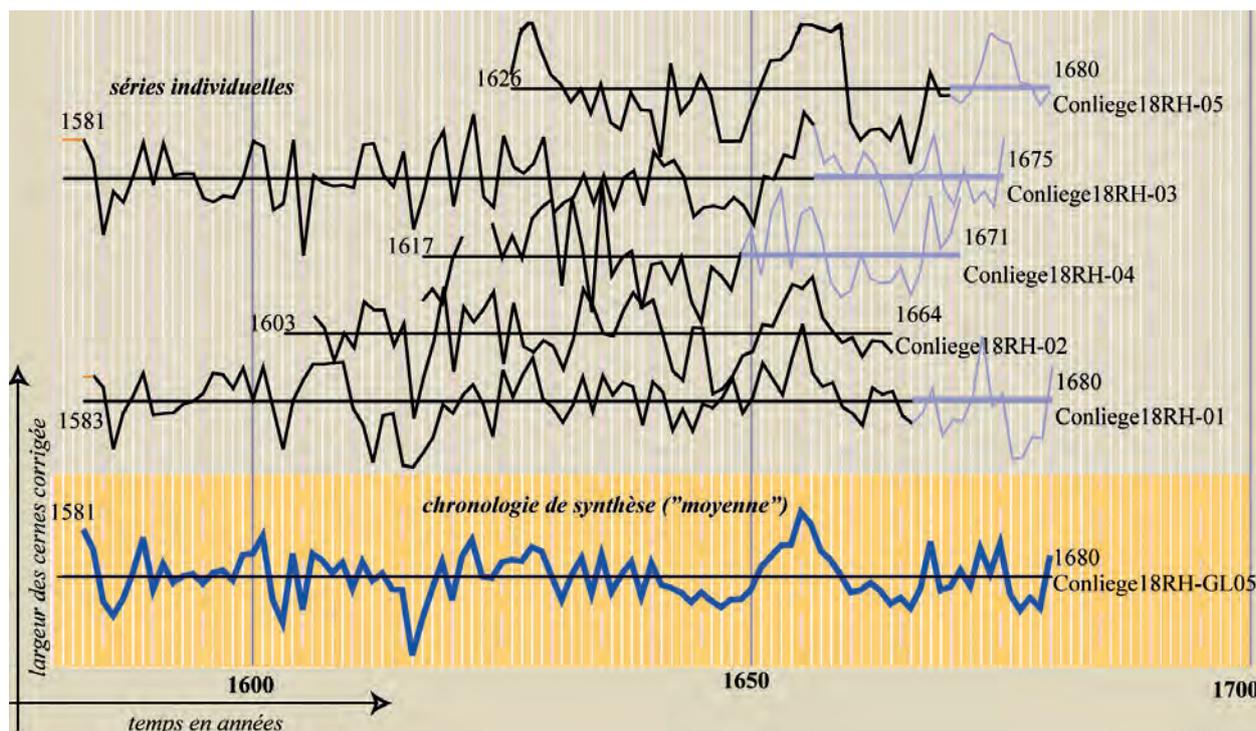
VI - EXEMPLE : DATATION DE LA CHARPENTE DE LA MAISON CURRAT, 18, RUE HAUTE À CONLIÈGE, JURA

Appliquons ces calculs à un exemple précis, un petit ensemble, 5 bois de la charpente d'une maison datée XVII-XVIII^e siècles dans un village du Jura, Conliège. Les échantillons ont livré des séries cohé-

rentes, de 55 à 78 cernes, qui, synchronisées, ont permis l'établissement d'une *chronologie* de synthèse de 100 ans (Figure 10). Ces chronologies sont cependant marquées par des particularités, des accidents de



Figure 10 - Eléments dendrochronologiques de la charpente de la maison Currat à Conliège (Jura) qui a livré cinq bois. Les cinq séries synchronisées ont permis de construire une chronologie moyenne de 100 cernes. Notons la personnalité marquée des séries les plus courtes.



croissance, surtout les deux plus courtes. Une telle datation ne laisse pas augurer d'une datation facile en raison du petit nombre de séries, 15 ou 20 séries auraient fourni probablement un meilleur signal local. Diverses contraintes du chantier ont conduit à limiter les prélèvements et, de ce fait, les conditions sont typiques d'un cas à problèmes dendrochronologiques potentiels. Si la datation peut tout de même être espérée, car une chronologie de 100 ans a quand même été générée, il y avait lieu, à ce stade du travail, de douter de l'aptitude de cette chronologie à participer au référentiel. En fait, la datation a très bien fonctionné (Figure 11), la chronologie s'installe confortablement dans la période 1581-1680. Par ailleurs, les calculs acceptent la chronologie de Conliège avec un bon niveau de confiance, supérieur à certains coefficients d'autres éléments déjà intégrés au référentiel (en bas ou à droite de la matrice). L'ajout de cette chrono-

logie à ce groupe de référence va donc, contre toute attente, renforcer l'homogénéité du signal.

Les « erreurs » calculées selon la méthode ci-dessus sont invisibles au dessus de cinq décimales dans 12 cas (sur 16) puis elles montrent une rapide croissance dans les 4 derniers cas pour atteindre les 4% ($f=0,96097=0,96$) pour la dernière chronologie. S'il y a lieu de purger cet ensemble, c'est le bas de la matrice qu'il faudrait purger. En effet introduire, une erreur potentielle de l'ordre de 4% à l'entrée de calculs – qui considèrent par hypothèse que la datation ne comporte pas d'erreur – serait mal venu. Ce n'est pas ce qui sera fait, car le groupe de chronologies discuté est un sous-ensemble d'une base de données étendue et les fortes valeurs des erreurs des éléments 13 à 16 sont réduites dans le groupe étendu à toutes les références de l'époque.

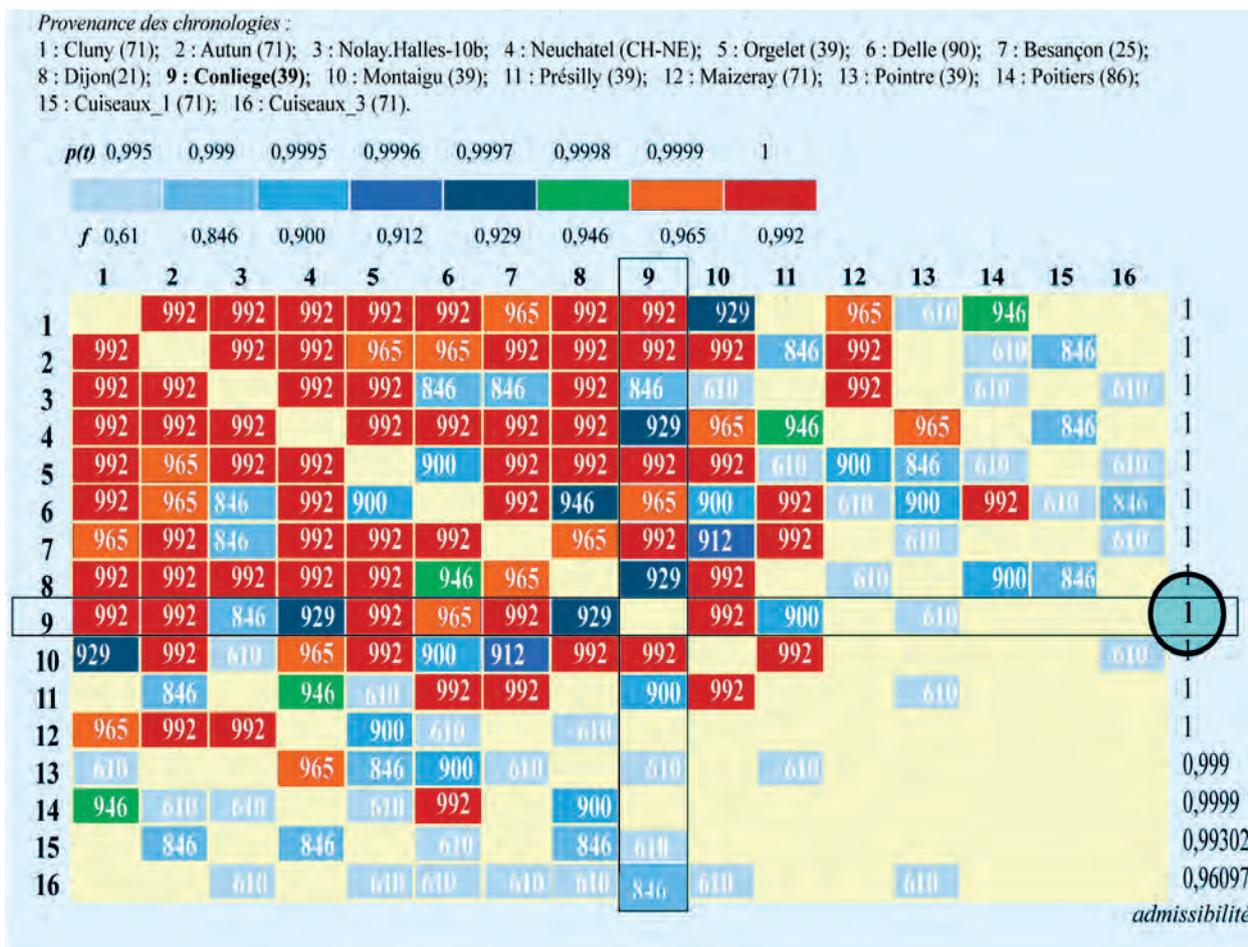


Figure 11 - La chronologie de Conliège a été datée par un lot de références de la même région (plus Poitiers !). Le calcul suggère une excellente admissibilité dans le groupe (1 = 100%). Donc, malgré une personnalité assez marquée des croissances (voir Figure 10), ces bois peuvent participer au référentiel.

CONCLUSION

Basées sur 125 970 calculs initiaux, les *fréquences* calculées ci-dessus représentent une situation assez générale, qui dépasse celle du strict contexte de ce calcul. Elles peuvent être considérées comme de potentielles *probabilités* et ont été manipulées *comme telles*. Les résultats obtenus *in fine* sont valables dans les contextes de calcul équivalents. La correction de la probabilité fournie par le test t de Student en utilisant une table du type de celle de la Figure 11 est rendue nécessaire à cause des filtrages initiaux. Cette correction de la probabilité originale est en fait la conséquence d'une translation du niveau sélectif des tests liée au filtrage initial et d'une modification des propriétés de la population au regard des aptitudes du test. Mais sans filtrage, aucune opération de datation ne peut être bien conduite. En réalité, la manipulation du coefficient de corrélation pour aboutir à une probabilité à l'aide du test de Student ou non, requiert des conditions précises dont l'analyse est souvent négligée par les praticiens (Armatte, 2001 et les travaux de Fréchet bien rapportés par cet auteur). Il y aurait donc lieu de s'attacher aux propriétés et conséquences de ce filtrage pour lui retirer son coté arbitraire, mais ici et sous cet éclairage, il *fonctionne*.

Le calcul proposé permet d'attribuer pratiquement, pour un *montage* donné, un niveau d'*admissibilité* à toute nouvelle chronologie, ce niveau étant

alors acceptable ou non. Il est important de noter que ce niveau, pour une même chronologie qui participerait à divers montages, varie d'un montage à l'autre. La dynamique du processus réside précisément dans cette propriété : des éléments refusés pouvant être intégrés à terme tandis que la place d'autres, dont l'admissibilité faiblirait régulièrement à mesure que le groupe s'accroît, peut être remise en cause.

Ce type de calcul, dans les opérations de regroupements de grandes quantités de données issues de sources différentes, permet de fixer un *seuil de sélection mobile mais explicite*, formellement défini pour tout le monde, et pas forcément figé à une valeur donnée. Il est en effet légitime de jouer avec le niveau d'erreur maximum admis, en fonction des objectifs.

L'outil aboutit quand même à éconduire un certain nombre de propositions faites par des méthodes moins formalisées. Il nous est arrivé de rejeter jusqu'à 35% des bois datés par ailleurs. Comprenons bien qu'il ne s'agit pas de remettre en cause les conclusions du travail fait en amont – bien que cela arrive de temps en temps –, mais surtout de réduire un effet de brouillard qui s'installe inévitablement dans la base de données résultante à cause de l'hétérogénéité des paramètres non formels impliqués, effet qui s'aggrave avec l'accumulation des données.

Remerciements

Cet article est une contribution à ESCARSEL, projet financé par l'Agence nationale de la Recherche (programme VMC, projet ANR 06-VULN-010).

BIBLIOGRAPHIE

- ARMATTE M., 2001. Maurice Fréchet statisticien, enquêteur et agitateur public. *Revue d'Histoire des Mathématiques*, 7, 7-65.
- BAILLIE M.G.L., PILCHER J., 1973. A simple crossdating program for Tree-Ring Research. Tucson (AZ), *Tree Ring Bulletin*, 33, 7-14.
- BENISTON M., 2002. Climate modeling at various spatial and temporal scales: where can dendrochronology help? *Elsevier/Dendrochronologia*, 20-1, 117-131.
- BERNARD V., 1998. L'Homme, le Bois et la Forêt dans la France du Nord entre le Mésolithique et le Haut Moyen-Age. BAR International Series, 733, Oxford ; 1998, 190 p.
- JONES P.D., BRIFFA K.R., OSBORN T.J., LOUGH J.M., VAN OMMEN T.D., VINSTER B.M., 2008. High-resolution paleoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *Holocene*, 19, 3-49.
- COOK E.R., BRIFFA K.R., JONES P.D., 1994. Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques. *International Journal of Climatology*, 14, 379-402.
- DAGNELIE P., 1973, 1975. Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques, / 1. La statistique descriptive et les fondements de l'inférence statistique. / 2. Les méthodes de l'inférence statistique / 3. Analyse statistique à plusieurs variables. Presses agronomiques, Gembloux (B), 3 vol.
- DUPOUEY J.-L., DENIS J.-B., BECKER M., 1992. A new method of standardization for examining long-term trends in tree-ring chronologies. In *Tree rings and environment, Proceedings of International Dendrochronological Symposium, Ystad (Sweden), 3-9/1990*. Lundqua Report, 34, 1992, 85-88.

- DUROST S., 2005. Dendrochronologie et dendroclimatologie du deuxième âge du Fer et de l'époque romaine dans le Nord et l'Est de la France. Datations, Système de références et modélisations. Dissertation, Université de Franche-Comté, Besançon, 175 p.
- ECKSTEIN D., 1969. Entwicklung und Anwendung der Dendrochronologie zur Alterbestimmung der Siedlung Haithabu. Phil D., Univ. de Hambourg, 1969, 113 p.
- ESPER J., COOK E.R., KRUSIC P.J., PETERS K., SCHWEINGRUBER F.H., 2003. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research*, 59, 81-98
- FISHER R., 1925-1970. Statistical Methods for Research Workers. (14th ed.). Edinburgh, Oliver and Boyd. 13^e ed. 1963, 356 p.
- FRAITURE P., 2007. Les supports de peintures en bois dans les anciens Pays-Bas méridionaux de 1450 à 1650 : analyses dendrochronologiques et archéologiques. Thèse de doctorat, Université de Liège. 3 vol.
- FRITTS H.C., 1976. Tree rings and Climate. Academic Press, London, 567 p.
- GASSMANN P., 1984. Dendrochronologie : 100 000 cernes sur Cortaillod-Est. Basel, *Archäologie der Schweiz*, 7-2, 63-68 .
- GASSMANN, P., PILLONEL D., TEGEL W., 2006. Bois d'œuvre et analyses dendrochronologiques. In Montillier/Dorf, fouille Strandweg 1992/1993, nouvelles données sur la Culture Cortaillod au bord du lac de Morat. *Cahiers d'Archéologie Fribourgeoise*, 7, (2005), 24-29
- GIRARD CLOS O., 1999. Dendrochronologie du chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*), influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques. Applications paléo-écologiques aux bois subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique). Thèse, M. Bidault Dir., Besançon ; 1999, 377 p.
- GUIBAL F., POMEY P., 2008. Attempts of dating ancient shipwreck hulls in the western Mediterranean by dendrochronology. TROPIS X, 10th International Symposium on Ship Construction in Antiquity, Hydra (Grèce), 27 août-2 septembre 2008.
- GUIOT J., TORRE, F., JOLLY D., PEYRON O., BOREUX J.J., CHEDDADI, R., 2000. Inverse vegetation modeling by Monte Carlo sampling to reconstruct palaeoclimates under changed precipitation seasonality and CO2 conditions: application to glacial climate in Mediterranean region. Elsevier, *Ecological Modelling*, 127, 119-140.
- GUIOT J., NICAULT A., RATHGEBER C., EDOUARD J.-L., GUIBAL F., PICHARD G., TILL C., 2005. Last-millennium summer-temperature variations in western Europe based on proxy data. *The Holocene*, 15 (4), 489-500
- HOFFSUMMER P., 1995. Les Charpentes de toitures en Wallonie, typologie et dendrochronologie (XI^e-XIX^e siècle). Ministère de la Région wallonne, Division du Patrimoine, Namur. 171 p.
- HOUBRECHTS D., 2008. Le logis en pan-de-bois dans les villes du bassin de la Meuse moyenne (1450-1650). Liège, Dossier de la Commission royale des Monuments, Sites et Fouilles, 12).
- LAMBERT G.-N., 2006. Dendrochronologie, histoire et archéologie, modélisation du temps; le logiciel Dendron II et le projet Historic Oaks. HDR, Université de Franche-Comté, Besançon. 2 vol., 151 et 205 p.
- LAMBERT G.-N., 2008. A Century of Dendrochronology and Archaeology. Quiet activities ? In Lehoërff A. (ed.), Construire le temps. Histoire et méthodes des chronologies et calendriers des derniers millénaires avant notre ère en Europe occidentale. Actes du XXX^e colloque international de Halma-Ipel, Lille 2006, Bibracte 16, Glux-en-Glenne-Bibracte, 113-122.
- LAMBERT G., SAINT-JEAN-VITUS B., TAUPIN J.-L., TRENARD Y., 2008. La datation dendrochronologique est-elle une science ? Une question de vocabulaire. Exemples du Tournaigeois et du Petit Louvre de la Pacaudière. In Structures en bois dans le patrimoine bâti. Actes des journées techniques internationales du Bois à Metz (29-31 mai 2008). Paris, Icomos-France, 22-27.
- LAMBERT G.-N., 2010. Dendrochronology, archaeology and science. Bruxelles. Actes du Colloque Tree Ring, Art and Archaeology, février 2010. 11 p. dactyl. dont 13 fig.
- LAMBERT G., LAVIER C., 1991. A new historical master chronology for dendrochronology of the oak in the East of France. Questions about the dating in a large geographical area. *Dendrochronologia*, 9, 165-180.
- LEBOURGEOIS F., 2006. Sensibilité au climat des chênes sessile (*Q. petraea*) et pédonculé (*Q. robur*) dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 53, 1, 29-44.
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C., MERIAN P., ULRICH E., 2010. Sensibilité des écosystèmes forestiers tempérés français à la variabilité climatique et aux événements extrêmes. Exemple du réseau RENECOFOR. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009. *Collection EDYTEM*, 11, 21-28.
- SNEDECOR G.-W., COCHRAN W., 1937. Statistical Methods. Ames, Iowa State University Press. Version française 1971 : *Méthodes statistiques*. Paris, Association de Coordination Technique Agricole, 649 p.
- SHIYATOV S.G., FRITTS H.C., LOGFREN R.G., 1989. Comparative Analysis of the Standardization Methods of Tree-Ring Chronologies. In Noble R.D., Keith J.L.M., Jensen F. eds : Proceedings of the second US-USSR Symposium on Air Pollution Effects on Vegetation including Forest Ecosystems. International Conference of Corvallis, Oregon; Raleigh, North Carolina; Gatlinburg, Tennessee, September 1988. 13 - 25.
- TEGEL W., HAKELBERG D., 2008. Dendrochronologische Untersuchungen an Holzfunden vom Neumarkt in Dresden. *Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodendenkmalpflege*, 48/49, 2006/2007, 391-401.
- TEGEL W., VANMOERKERKE J., 2008. Le bois en archéologie. Images de l'archéologie rurale en Champagne-Ardenne. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*, 99, 2 avril-juin 2006, (Reims 2008), 36-47.

Un projet pour le développement d'outils dendrométriques appliqués à l'anthracologie État de l'art et perspectives

DUFRAISSE A.

*Archéologies et Sciences
de l'Antiquité (ArScAn), CNRS, Paris.
Contact : alexa.dufraisse@wanadoo.fr*

RÉSUMÉ

Les questions que soulèvent les rapports entre les hommes et le milieu dans le temps et dans l'espace peuvent être explorées par différentes approches, archéologiques, ethnographiques ou environnementales. Dans les sites archéologiques, les charbons de bois constituent d'excellents marqueurs des milieux parcourus par l'homme et des formations végétales qui s'y développent. Résidus émanant du bois de feu sélectionné et transporté par l'homme, ils sont aussi le reflet des usages, des techniques et des modes de gestion de l'espace forestier. L'anthraco-analyse reste néanmoins le plus souvent réduite à l'identification d'une liste d'essences

et de leurs proportions sans que le potentiel d'information contenue dans les cernes du bois ne soit exploité. Ainsi, la restitution ne serait-ce que des caractéristiques morphologiques du bois exploité (taille, âge, forme) à partir des charbons de bois archéologiques pose encore aujourd'hui des problèmes méthodologiques. Le principal objectif du projet DENDRAC est de mettre en place une gamme complète d'outils méthodologiques, ou patrons anthracométriques, qui permettront à l'anthracologue d'accéder à la morphologie du bois exploité et par là même à la physiologie de l'arbre et des peuplements desquels ils sont issus. Dans le cadre de ce colloque, nous nous proposons donc de présenter un état de l'art des approches éco-anatomiques, morphologiques (restitution des calibres de bois) et dendroécologiques (exploitation des cernes de croissance) applicables sur des assemblages de charbons de bois archéologiques dont la taille des fragments ne permet pas d'utiliser les méthodes classiques de la dendrochronologie en raison du nombre restreint de cernes représentés. Les questions relatives au projet seront ensuite présentées.

Approche descriptive de résultats de datation par dendrochronologie

GIRARDCLOS O.¹, PERRAULT C.²

¹ *Laboratoire ChronoEnvironnement, CNRS, Besançon.*

² *CEDRE, Besançon.*

Contact : olivier.girardclos@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

L'interdatation est définie comme l'« *Opération consistant à établir des concordances entre des largeurs de cernes ou d'autres caractères provenant de plusieurs échantillons. La concordance temporelle entre ces séquences caractéristiques, lorsqu'elle est vérifiée, permet d'attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa mise en place, et à identifier l'origine géographique du ou des arbres* » (Online Glossary of Dendrochronology). La définition recouvre tous les procédés (comparaison visuelle ou statistique de courbes de largeurs, de skeleton-plots, des bois eux-mêmes) qui mettent en évidence la correspondance chronologique entre les cernes d'arbres différents. Dans l'usage, l'interdatation recouvre un champ plus large. La mise en relation chronologique est complétée par des interprétations avancées en conséquence lorsqu'elle est vérifiée ou justifiée, telles la datation absolue, l'origine des bois, l'existence d'un signal commun... Les concepts apparaissent particulièrement liés lorsqu'une conséquence de l'interdatation sert à sa justification. L'usage

de l'interdatation n'échappe pas au contexte de l'étude. En dendroarchéologie, évaluer le signal commun a un sens lors de la construction d'une référence représentative d'une entité homogène, en moyennant des largeurs. Mais lorsque l'objectif est la datation absolue, la décision d'attribuer une année de formation aux cernes repose sur la synchronisation elle-même. Il n'est pas directement nécessaire de décrire les facteurs qui sont responsables de ce rapprochement, car les interprétations faites ne sont pas uniquement dendrochronologiques. Par ailleurs, les facteurs environnementaux induisent une variabilité spatiotemporelle de la croissance. Dans certaines situations, il n'est pas profitable à l'interdatation de la contraindre voire de la réduire, par la recherche d'un signal commun. Les datations s'opèrent alors dans un réseau de chronologies de site en base de données. Des propositions sont faites pour justifier l'interdatation des séries directement à partir des données de la synchronisation. La communication présente les classes de risque proposées par A. Billamboz, l'approche par matrices du logiciel Dendron (G.N. Lambert) et le protocole mis en place par L.A. Larsson. La majorité des auteurs, soucieux de justifier leur datation, liste les valeurs *t* de Student produites en suivant le protocole de M.G.L. Baillie et J. Pilcher (1973). Ce souci est profitable à la communauté car une description a posteriori des valeurs *t* sur lesquelles ont porté les décisions de datation paraît plus efficace qu'une réponse plus théorique à la question : *What is a good TTest value to ensure a dating ?* (L.A. Larsson).

Extraction d'un signal commun à partir de largeurs de cernes d'arbre à l'aide d'un modèle bayésien hiérarchique

GUIN O.¹, NAVEAU P.¹, BOREUX J.-J.²

¹ *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), CNRS, Gif-sur-Yvette.*

² *Université de Liège, Arlon, Belgique.*

Contact : Ophelie.Guin@lsce.ipsl.fr

RÉSUMÉ

L'une des hypothèses fondamentale de la dendrochronologie est que les cernes d'arbres répondent (d'une manière à déterminer) aux variations du climat passé. D'un point de vue statistique, le problème de l'extraction d'une information climatique peut être vu comme la recherche d'une variable aléatoire cachée représentant un facteur commun

aux cernes d'arbres d'une même espèce échantillonnée sur un site géo-référencé. Une telle extraction reste assez compliquée car les variations de croissance de l'arbre au cours de sa vie dépendent d'une combinaison de facteurs climatiques et non climatiques. Bien sûr, différentes méthodes ont déjà été développées. On peut notamment citer la méthode par ajustement d'une courbe exponentielle négative (Esper *et al.* 2002) ou, plus récemment, une approche par réseau de neurones (Nicault *et al.* 2008). Cependant, toutes ces méthodes demandent une normalisation des données ce qui entraîne la perte d'une partie de l'information contenue dans les cernes d'arbres. D'autre part, il manque très souvent une quantification précise de l'incertitude associée à la distribution de la variable cachée extraite. Afin de palier ces difficultés nous proposons, sous le paradigme bayésien, un modèle statistique semi-paramétrique impliquant cette variable cachée dans une structure hiérarchique.

Prise de données non destructives en milieux contraignants sur les bois constitutifs des œuvres des musées de France

LAVIER C.

Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), CNRS, ministère de la Culture, Paris.

Contact : Catherine.lavier@culture.gouv.fr

RÉSUMÉ

Depuis 2006, le C2RMF, du ministère de la Culture, et l'UMR171, du CNRS, ont spécifiquement axé l'un de leurs thèmes sur la chronologie et la circulation des matériaux constitutifs des objets et des œuvres d'art, notamment conservés dans les musées français : l'archéodendrométrie y tient une part importante dans leur étude qu'il s'agisse d'œuvres

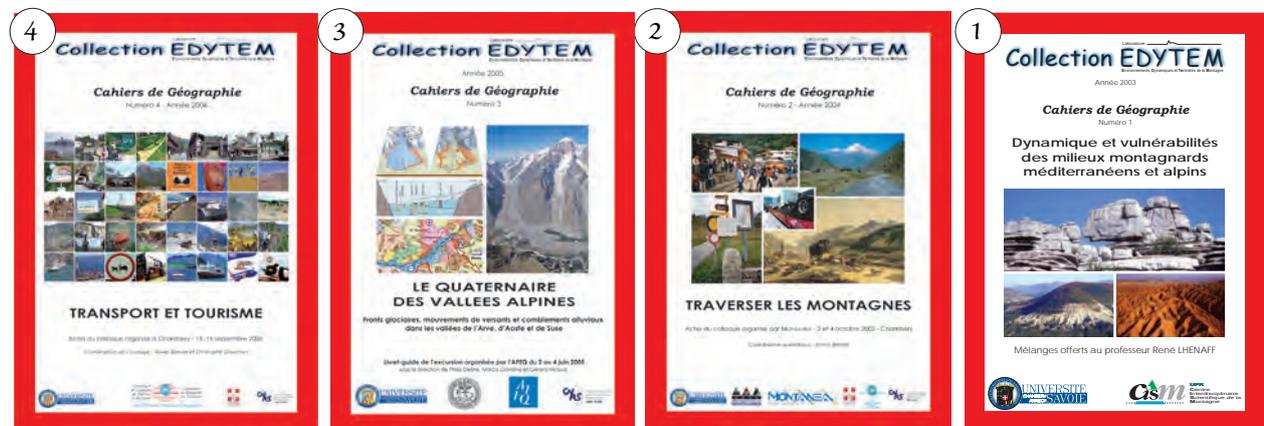
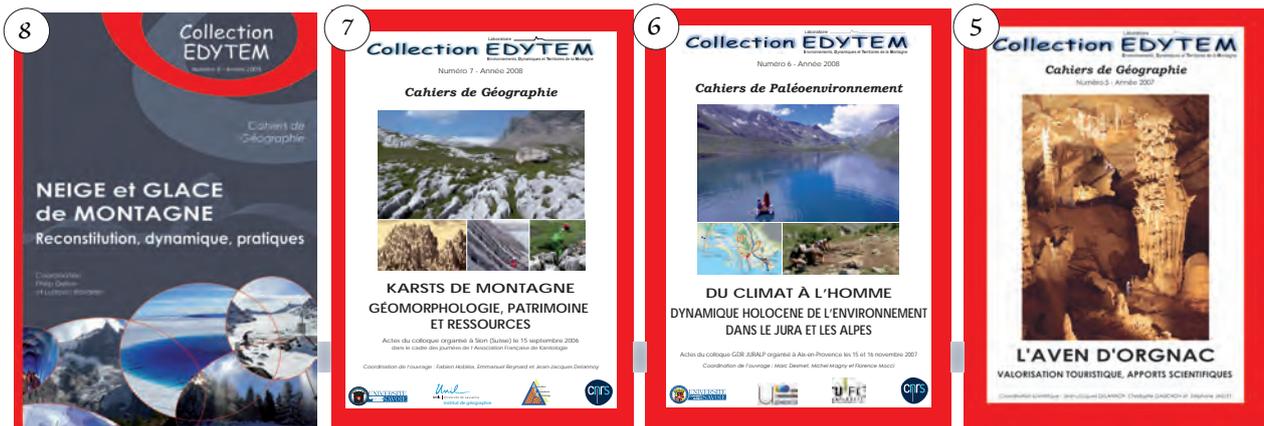
illustres ou d'objets du quotidien, rituel ou artisanal. Le but est à la fois d'authentifier l'objet, de définir la provenance et de restituer le façonnage des matériaux et le savoir-faire de l'artiste. Aussi la dendrochronologie est-elle une étape souvent indispensable pour les œuvres faites à partir d'arbres à croissance annuelle. Contrairement aux bois des fouilles archéologiques ou des éléments du bâti, seuls sont tolérés des microfragments retirés pour les analyses complémentaires comme l'AMS ou la micrographie du bois. Des techniques absolument non destructives ni invasives sont donc employées ou en cours de développement pour accéder à l'information de base de toute étude archéodendrométrique, à savoir le cerne. La qualité de la mesure qui en est faite est primordiale à toute interprétation et restitution dendrochronologique. Issues de méthodes physiques et optiques, plusieurs techniques seront présentées afin de montrer l'étendue des possibilités actuelles et futures.

Collection **EDYTEM**

ISSN 1762-4304

Laboratoire **EDYTEM**
Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

*Complétez
votre
collection !*



À paraître :

N° 12 (2011) - Images et modèles 3 D en milieux naturels
N° hors série - La Mer de Glace. Objet d'art, objet de science

COMPLETEZ VOTRE COLLECTION

| | Prix du N° | Frais de port |
|--|------------|---------------|
| CAHIERS SAVOISIENS DE GÉOGRAPHIE | | |
| N° 1 (1997) : Transports et développement en Pays de Savoie | 10 € | 3 € |
| N° 2 (1999) : Livret guide des excursions Grands Causses - Vercors | épuisé | |
| N° 3 (2000) : La géographie des risques dits «naturels» entre géographie fondamentale et géographie appliquée | 10 € | 3 € |
| N° 4 (2001) : Identités et territoires | 10 € | 3 € |

| COLLECTION EDYTEM | | |
|--|------------------------|-----|
| N° 1 (2003) : Dynamique et vulnérabilités des milieux montagnards méditerranéens et alpins | 15 € | 3 € |
| N° 2 (2004) : Traverser les montagnes | 15 € | 3 € |
| N° 3 (2005) : Le Quaternaire des vallées alpines | épuisé, pdf en ligne * | |
| N° 4 (2006) : Transport et Tourisme | 15 € | 3 € |
| N° 5 (2007) : L'Aven d'Orgnac, valorisation touristique, apports scientifiques | 15 € | 3 € |
| N° 6 (2008) : Du climat à l'homme : Dynamique holocène de l'environnement dans le Jura et les Alpes | 15 € | 3 € |
| N° 7 (2008) : Karsts de montagne : Géomorphologie, patrimoine et ressources | 15 € | 3 € |
| N° 8 (2009) : Neige et glace de montagne : reconstitution, dynamique, pratiques | épuisé, pdf en ligne * | |
| N° 9 (2009) : L'hydrothermalisme en domaine continental : Fonctionnement, ressource et patrimoine | 15 € | 3 € |
| N° 10 (2010) : Espaces protégés, acceptation sociale et conflits environnementaux | 15 € | 3 € |
| N° 11 (2010) : Panorama de la dendrochronologie en France | 15 € | 3 € |

* Site web du laboratoire : <http://edytem.univ-savoie.fr/>
Plus d'informations sur chacun des documents sur ce site,
ainsi que les pdf en ligne des numéros épuisés.

Pour recevoir ces publications, adressez votre commande à :

Laboratoire EDYTEM, secrétariat, Université de Savoie, Campus scientifique,
F 73376 Le Bourget du Lac Cedex

accompagnée d'un chèque (à l'ordre de M. l'Agent Comptable de l'Université
de Savoie), ou d'un mandat administratif.

PANORAMA de la DENDROCHRONOLOGIE en FRANCE

Sommaire

Éditorial.

Avant-propos.

TESSIER L. - Introduction scientifique - La dendrochronologie : retour vers le passé.

DENDROÉCOLOGIE

LEBOURGEOIS F. *et al.* - Sensibilité des écosystèmes forestiers tempérés français à la variabilité climatique et aux événements extrêmes : exemple du réseau RENECOFOR.

RATHGEBER C. - Influence du statut social des arbres sur la dynamique intra-annuelle de la formation du bois.

MÉRIAN P. *et al.* - Déterminisme climatique des années de croissance extrême chez le chêne sessile dans la moitié nord de la France.

NIEDERLENDER L. *et al.* - Arboretum et dendroécologie : dépérissement du cèdre.

CUNY H. *et al.* - Dynamique intra-annuelle de la formation du bois de trois espèces de conifères (Épicéa commun, Pin sylvestre et Sapin pectiné) dans les Vosges.

DENDROCLIMATOLOGIE

CORONA C. *et al.* - Reconstruction des températures estivales dans les Alpes françaises au moyen de données dendrochronologiques (749-2008 AD).

SAULNIER M. *et al.* - Étude de la relation entre la croissance du Pin cembro et le climat dans les Alpes Françaises depuis 500 ans.

DENDROGÉOMORPHOLOGIE

STOFFEL M. - L'histoire des dangers naturels se lit dans les cernes des arbres.

ARBELLAY E. *et al.* - Reconstitution dendrogéomorphologique d'événements de lave torrentielle à l'aide de feuillus blessés.

CORONA C. *et al.* - Apport de la dendrogéomorphologie pour la reconstruction spatio-temporelle des avalanches. L'exemple du dépôt avalancheux Pierres Jean Jeanne (Massif de l'Oisans, France).

ZANETTI C. *et al.* - Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales.

LOPEZ SAEZ J. *et al.* - Le couvert forestier, marqueur spatio temporel de l'activité d'un glissement de terrain.

ASTRADE L. *et al.* - Dendrochronologie en ripisylve. Des cernes aux changements hydromorphologiques dans les systèmes fluviaux.

DENDROARCHÉOLOGIE

GUIBAL F. *et al.* - Dendrochronologie des charpentes et plafonds peints médiévaux en région méditerranéenne.

BELINGARD C. *et al.* - Exploitation à visée archéo-environnementale des patrons de croissance des bois prélevés pour la datation du bâti. Le cas des châtaigniers de la grange ovale de Saint-Eloy-les-Tuilleries, Corrèze.

DIETRICH A. *et al.* - Arbres non forestiers et dendrologie. Apports de l'étude de jeunes branchages archéologiques du nord de la France.

ÉDOUARD J.-L. - Datation dendrochronologique du bâti traditionnel et occupation humaine dans les Alpes françaises du Sud au cours du dernier millénaire.

MÉTHODES

LOPEZ SAEZ J. *et al.* - L'utilisation de la resistographie en dendrogéomorphologie. Retour d'expériences.

MIRAMONT C. *et al.* - L'apport des séries dendrochronologiques françaises au prolongement de la chronologie européenne absolue et à la calibration du radiocarbone.

PARADIS-GRENOUILLET S. *et al.* - AnthracLoJ : un outil pour la simplification des mesures dendrométriques.

LAMBERT G. *et al.* - Dendrochronologie et dendroclimatologie du chêne en France. Questions posées par le transfert de données de bois historiques vers la dendroclimatologie.

La «Collection Edytem» a pour objet de mettre en avant l'apport de la géographie, de la géologie et des sciences de l'environnement dans l'étude des milieux et territoires de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle met en avant les travaux réalisés au sein du laboratoire Edytem et les résultats de ses programmes et actions de recherche.

Prix 15 euros

ISBN 978-2-918435-03-7



9 782918 435037

