

O r p a l

synthesis 2014



Lac du Salagou, Hérault

ORPAL - Synthesis

Revue annuelle
de Paléocécologie
n°7 - Année 2014

Editeur en chef
Jean-Frédéric TERRAL ^{1,3}

Editeurs associés
Adam ALI ^{1,3}
Laurent BRÉMOND ^{1,4}
Benoît BROSSIER ^{1,5}
Vincent GIRARD ^{1,3}
Sarah IVORRA ^{1,5}
Serge MULLER ^{2,3}
Laure PARADIS ^{1,5}

¹ CBAE, ² ISEM,
³ UM2, ⁴ EPHE, ⁵ CNRS

Auteurs

Nathaly COLLET, Thomas
DAMESTOY, Léa DAURES,
Jeremy DAYDE, Étienne DELOR,
Jeremy DETREY, Guillaume
FORT, Antoine GAZAIX,
Djélanne GUSTAVE, Eve
LACASSAGNE, Pierre
LEMAISTRE, Marion
LESTIENNE, Océane
LIEHRMANN, Marion MAURIN,
Lucie MATO, Lauriane
NAVARRO, Louis NERRIERE,
Émilie PACHOT, Julie PASTOR,
Alice SALMON, Fanny
SANTUCCI, Marie-Paule
SAVELLI, Quentin VAUTRIN

Travail éditorial
Serge MULLER

Publication
3^e trimestre 2014

ORPAL 2014 : des dinosaures aux étudiants

Après deux années passées dans les Cévennes, le cadre des investigations a été le bassin du Salagou, véritable livre ouvert sur 280 millions d'années d'histoire : témoignages de pluies torrentielles, phases d'assèchement, érosion, effondrement de montagnes, enfouissement, sédimentation, volcanisme, coulées, tremblements de terre, inversions de relief, empreintes de reptiles... Le lac du Salagou s'inscrit dans un paysage exceptionnel dominé par la « ruffe », roche constituée de sédiments rouges argileux et gréseux, riches en oxydes de fer, qui se sont déposés par séquences régulières (alternances de phases d'invasion lagunaire / phases d'assèchement) entre 280 et 225 millions d'années (Permien).

Mis en eau en 1969, ce lac a été pensé pour l'agriculture. Dans une région dont l'économie viticole s'épuisait, le lac devait permettre une mutation agricole par une diversification des cultures favorisée par l'irrigation. Cette mutation n'eut jamais lieu. Le bassin garda sa spécificité viticole, mais mise avec succès sur la qualité, plutôt que sur la quantité. Aujourd'hui, le lac joue un rôle dans l'agriculture locale, mais a surtout une fonction touristique, récréative, de sécurité civile (lutte contre les incendies), et bien entendu, pédagogique.

Cartographie et SIG, sédimentologie, collecte et analyse de bioproxies, taphonomie, dendrochronologie, palynologie, xylogie et anthracologie sont les domaines et les méthodes auxquels les étudiants de la cuvée ORPAL 2014 ont pu se familiariser lors de l'école de terrain (22-24 janvier) et du stage en laboratoire qui a suivi. 2014 est sans conteste un bon cru.

Cette année encore, nous n'avons pas dérogé à la règle qui veut que la perfectibilité des travaux intrinsèque à toute construction d'ordre scientifique, s'efface devant le bilan méthodologique, scientifique et humain de cette école de terrain.

Jean-Frédéric Terral
Editeur en chef d'Orpal Synthesis



Les étudiants d'ORPAL 2014, que les enseignants, habilement camouflés, encerclent discrètement

ORPAL : module d'enseignement-recherche avec de vrais morceaux d'humain dedans

ORPAL en bref

ORPAL est une unité d'enseignement proposée en 3^{ème} année de Licence Géosciences Biologie Environnement (GBE), UFR Fac des Sciences, Département d'enseignement Biologie-Ecologie, Université Montpellier 2.

Contenu pédagogique

Sur la thématique de la reconstruction des environnements passés, cette unité d'enseignement (UE) est dévolue quasi-exclusivement à la pratique et à l'expérimentation. Toute la chaîne opératoire des recherches est considérée : le questionnement, la problématique, la recherche bibliographique, le terrain, le travail en laboratoire, le traitement des résultats, leur interprétation et la diffusion (écrite et orale) de l'information scientifique.

Déroulement d'ORPAL

ORPAL 1/5 : Briefing méthodologique

La reconstruction des paléoenvironnements : pourquoi et comment ? Présentation de l'UE, son organisation, de ses objectifs pédagogiques, des outils, des méthodes.

ORPAL 2/5 : Stage de terrain

Dans une zone bien circonscrite d'un point de vue géographique et écologique, quelques exemples de différentes approches utilisées : carottage sédimentaire pour les milieux lacustres ou palustres (pollen, rhizopodes, macrofossiles, microcharbons) ; carottage dendrologique (étude de la croissance et de la démographie des peuplements d'arbres). Le volume de «terrain» total est de 24 heures, réparties sur trois jours consécutifs.

Apport pour les étudiants

Cette unité d'enseignement est réellement originale et novatrice. Elle répond du mieux possible aux revendications des étudiants : découvrir le monde secret de la recherche, se former par la recherche à travers un stage conventionné par un établissement de l'enseignement supérieur, valider un acquis de l'expérience, ajouter une ligne concrète dans leur CV, découvrir la vie trépidante et tumultueuse d'un laboratoire, etc.

Constitution de l'équipe

Les étudiants, répartis en trinômes, choisissent un sujet sous la direction d'un enseignant-chercheur ou d'un chercheur de l'équipe pédagogique. Ce dernier sera leur référent chargé de suivre et d'évaluer leur progression tout au long de leur parcours.

ORPAL 3/5 : Stage en laboratoire

Sous la responsabilité d'un encadrant, temps d'analyse des données, de traitement statistique, de réflexion et d'analyse bibliographique. Une journée par semaine.

ORPAL 4/5 : Rédaction

Rédaction d'un mémoire synthétique relatif au sujet développé sous la forme d'un article scientifique. Présentation orale et intégration des corrections faites par un rapporteur.

ORPAL 5/5 : Evaluation et publication

Evaluation des articles par le comité de rédaction de la revue (note initiale réévaluée à l'issue du processus de *reviewing*) et publication des meilleures contributions (critères portant à la fois sur le fond et sur la forme).

NOTE : Les articles présentés dans cette revue, bien que corrigés par l'équipe pédagogique du module, sont des travaux réalisés par des étudiants de 3^e année. Ces exercices d'initiation à la rédaction scientifique ne peuvent pas être considérés et cités comme de véritables articles.

ORPAL : *n.m.* 1. Acronyme d' « Outils et méthodes de la Reconstruction des PALéoenvironnements ». Unité d'enseignement de l'Université de Montpellier-2, lancée en 2006-2007 ;

2. Revue annuelle de Paléoécologie du même nom.

ORPAL 2014

Lac du Salagou, Hérault

Collet N., Lacassagne E., Maurin M. & Nerriere L. : <i>Impact de la mise en eau du lac du Salagou sur l'occupation des sols depuis 1946 jusqu'à nos jours</i>	7
Dayde J., Detrey J. & Fort G. : <i>Reconstitution de 50 ans d'histoire de la sédimentation d'un lac d'origine anthropique (lac du Salagou)</i>	19
Mato L., Navarro L. & Santucci F. : <i>Référentiel des diatomées et des charbons présents dans le sédiment subactuel du lac du Salagou</i>	27
Gazaix A., Liehrmann O. & Savelli M.-P. : <i>Enregistrements polliniques actuels d'un bassin versant au sein du lac du Salagou</i>	39
Daures L., Lemaistre P., Lestienne M. & Pachot E. : <i>Anatomie du bois de quelques espèces ligneuses de la région du Salagou (Hérault) : caractères systématiques, traits biologiques et signatures écologiques</i>	53
Damestoy T., Gustave D. & Vautrin Q. : <i>Transport et dépôt des macrorestes végétaux en zone humide (Lac du Salagou, Hérault)</i>	69
Delor E., Pastor J. & Salmon A. : <i>Analyse comparée de la croissance radiale de trois espèces de Pinaceae utilisées en restauration forestière : étude de cas sur les abords du Lac du Salagou (Hérault, France)</i>	81



Ruffes permienes et neck basaltique pléistocène, à proximité d'Octon (S.D. Muller, 23 janvier 2014)

IMPACT DE LA MISE EN EAU DU LAC DU SALAGOU SUR L'OCCUPATION DES SOLS DEPUIS 1946 JUSQU'À NOS JOURS

Nathaly Collet¹, Eve Lacassagne², Marion Maurin³, Louis Nerriere⁴

Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie

Institut de Botanique, 163 Rue Auguste Broussonet, 34090 Montpellier, France

¹ nathaly.collet@etud.univ-montp2.fr, ² eve.lacassagne@etud.univ-montp2.fr,

³ marion.maurin@etud.univ-montp2.fr, ⁴ louis.nerriere@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Laure Paradis

Citation : Collet N., Lacassagne E., Maurin M. & Nerriere L. (2014). Impact de la mise en eau du lac du Salagou sur l'occupation des sols depuis 1946 jusqu'à nos jours. *Orpal Synthesis*, 7 : 7-17.

Résumé : Le site du Salagou est caractérisé par la mise en eau d'un lac artificiel en 1969, afin de réguler les crues de l'Hérault. L'étude SIG présentée porte sur l'évolution de l'occupation des sols de cette zone entre 1946 et 2001. Elle révèle une déprise agricole (réduction du nombre d'agriculteurs) induite par la formation du lac. Les expansions urbaines et démographiques après 1969 sont liées au développement de l'activité touristique. Enfin, l'augmentation du couvert forestier traduit la fermeture du milieu suite à l'abandon de l'écobuage et à la déprise pastorale.

Mots clés : SIG, photo-interprétation, évolution temporelle, Hérault

Abstract: *Impact of impoundment of Salagou Lake on soil occupation since 1946 until today.* The Salagou site is characterized by the creation of an artificial lake in 1969, in order to control the Hérault floods. The present GIS study focuses on the evolution of soil occupation in this area between 1946 and 2001. It reveals an agricultural abandonment (decrease in farmer number), resulting from the creation of the lake. Urban and demographic expansions after 1969 are related to the development of touristic activities. Finally, the forest-cover expansion translates the area closure due to the abandonment of both agricultural burning and pastoral activities.

Keywords: GIS, photo-interpretation, temporal evolution, Hérault

L'homme façonne et modifie son environnement. De nombreux paysages considérés comme naturels sont en réalité issus d'une anthropisation actuelle ou passée. Dans le Sud de la France, les espaces ouverts de matorral résultent d'une activité pastorale et agricole ancienne (Collectif des Garrigues, 2013). La gestion du territoire par le pastoralisme ou l'écobuage (débroussaillage d'hiver par le feu) permet de maintenir les espaces ouverts en limitant le développement des arbres. Le site du Salagou, à l'ouest de Clermont l'Hérault, a ainsi été façonné par les activités

humaines. Un lac artificiel a été mis en eau à la fin des années 1960, pour répondre à des besoins, tels que la lutte contre les crues de l'Hérault et l'aménagement d'une réserve d'eau pour l'irrigation. On retrouve des projets de barrage dès 1860 dans les archives, mais ce n'est qu'à partir des années 1950 que le projet prend forme.

Le Salagou se jette dans la Lergue, qui possède le bassin versant le plus vaste de tous les affluents de l'Hérault. Ce bassin est connu pour ses crues historiques (Musset et al., 2002), et en particulier celles de septembre à novembre 1907, qui ont ravagé l'intégralité

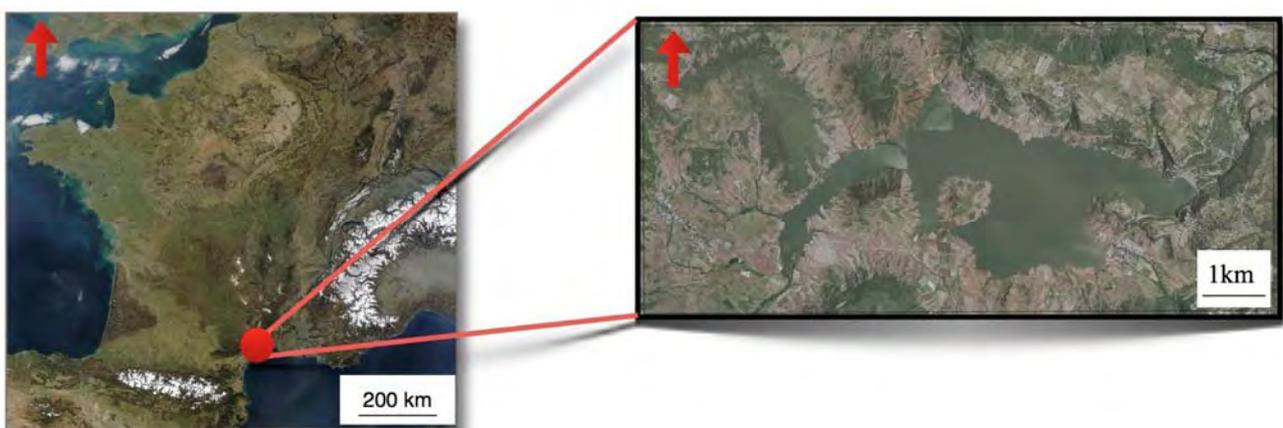
du territoire et déraciné des centaines d'hectares de vignes. Chaque épisode de crue impacte fortement l'agriculture et le bilan en terme de vies humaines est souvent lourd. Face à la surproduction viticole des années 1960, une reconversion agricole est envisagée dans tout le sud de la France. La création d'un bassin de rétention devait ainsi permettre d'irriguer la vallée pour développer une arboriculture fruitière. Cependant, la reconversion plus précoce d'autres régions de France en cultures fruitières a engendré une chute des cours du marché avant que le barrage ne soit fonctionnel. Le projet de diversification agricole du site du Salagou n'eut donc pas lieu, et le lac a aujourd'hui des fins principalement touristiques (CAUE de l'Hérault, 2010). La construction du barrage s'étale de 1964 à 1968, et les vannes du barrage sont fermées le 4 mars 1969. Cette année-là, suite à de forts épisodes cévenols, le lac se remplit de moitié en seulement deux semaines, mais il lui faudra au final trois ans pour atteindre son niveau actuel, fixé en 1996 par le conseil général à 139 m.

Le lac du Salagou est devenu un pôle touristique important du département. Le 21 août 2003, la vallée du Salagou entre dans le réseau Grands Sites et espère être classé Grand Site de France (www.grandsitede france.com). Pour cela, une politique de

gestion du site a été mise en place en 2006 par la communauté de communes (CAUE de l'Hérault, 2010). La caractérisation de l'occupation du sol est importante pour la préservation d'un site. Elle représente en effet une base de données utile pour étudier l'écologie du site et son évolution potentielle. La présente étude a pour objectif de préciser l'évolution de l'occupation des sols autour du lac du Salagou de 1946 à 2001. Ce travail se base sur les données d'archives recueillies, ainsi que sur la photo-interprétation des évolutions urbaines, agricoles et démographiques des communes concernées.

MATERIEL ET METHODES

L'étude sur le terrain s'est déroulée au Lac du Salagou, du 22 au 24 Janvier 2014 (Fig. 1). Des données de terrain ont été recueillies à l'aide de deux GPS JunoSB Trimble. Des points, lignes ou polygones représentent les zones d'intérêt, telles que les parkings, les plages aménagées et les structures de loisir ou d'accueil (Annexe 1). Cette sortie nous a également permis d'appréhender la réalité terrain. En effet, une enquête auprès des mairies, de la population locale et des campings a permis d'avoir une première idée de la situation géo-socio-politique actuelle.



Des photographies aériennes historiques (<http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>) ont été utilisées afin de visualiser l'occupation du

sol. Ce type de support est facile d'accès, peu coûteux et mis à jour assez régulièrement. Plusieurs missions aériennes sont disponibles

pour notre étude. Cinq dates, correspondant à des périodes marquantes pour le lac du Salagou, ont été sélectionnées :

- 1946 correspond à une période où le projet de barrage n'était pas encore envisagé.
- 1961 correspond à la mise en place du projet de barrage.
- 1970 est l'année suivant la mise en eau du lac.
- 1983 permet de faire un suivi de la mise en eau, ainsi que des aménagements liés au lac artificiel.
- 2001 permet de constater les éventuelles évolutions précédant de peu la classification de ce site en "Grand Site" en août 2003.

Les vues aériennes couvrent toute la zone d'étude, soit 4145,5 ha. Il s'agit de photographies sur un support papier scanné noir et blanc pour les années antérieures à 1996, et de photographies couleurs pour l'année 2001. Ces clichés ont été géo-référencés à l'aide du logiciel QuantumGIS (versions 2.0 et 2.2). Les vues aériennes de 2001 étaient déjà géo-référencées dans le référentiel Lambert 93 (système de référence français) et ortho-rectifiées, donc non déformées. Elles ont servi de support pour le géo-référencement des images antérieures. Nous avons choisi de faire au moins huit points de référencement afin d'avoir une précision suffisante pour travailler sur les données. Ces points de correspondance au référentiel doivent être situés principalement au centre des images car la périphérie est déformée lors de la prise de vue. Ainsi, plus les photos se chevauchent, plus les centres des images se superposent, réduisant ainsi les erreurs de géo-référencement. Les dates les plus anciennes ont été les plus difficiles à traiter, car il est difficile de se repérer en l'absence du lac et leur qualité est inférieure aux images actuelles. La petite taille des photos nous a obligés à géo-référencer un grand nombre de prises de vue afin de couvrir la zone d'étude. Les points de géo-référencement étaient ainsi plus proches, et les zones périphériques plus étendues.

Les écarts entre nos points et les points de référence sont représentés par des erreurs moyennes quadratiques (RMS), c'est à dire la

racine de la moyenne des carrés des valeurs. Nous avons fait en sorte que chacune d'elles soit inférieure à 15 pour chaque photo aérienne afin de limiter la déformation (Conolly & Lake, 2006). Ces écarts faibles engendrent tout de même des distorsions et les photos ne sont pas parfaitement calées les unes par rapport aux autres. Ce décalage est une source d'erreur potentielle pour la photo-interprétation. Pour atteindre une RMS inférieure, une ortho-rectification aurait été nécessaire, mais impossible à réaliser dans le temps imparti (Leprince et al., 2007).

Les mosaïques d'images par année permettent de photo-interpréter la zone du Salagou. Afin de visualiser l'évolution de l'occupation des sols au cours des 60 dernières années, des polygones correspondant à chaque type d'occupation ont été tracés manuellement sur toute la zone d'étude (Annexe 2). Cinq occupations du sol peuvent être distinguées: lac, zone agricole, forêt, matorral et ville. La forêt méditerranéenne est essentiellement composée d'espèces à feuillage sempervirent, telles que le chêne vert (*Quercus ilex*) ou des conifères. A l'inverse de ce milieu fermé, le matorral est un milieu ouvert. Les parcelles agricoles sont principalement représentées par des vignes. Enfin, les zones définies comme urbaines englobent les villes, les campings, le barrage, ainsi que les aménagements de loisir.

Il a été nécessaire de s'accorder sur le traitement et l'interprétation des données pour permettre leur croisement ultérieur. L'échelle a été fixée à 1/5 000, et les polygones ont été tracés au plus près du centre des photos les moins déformées. Pour éviter les chevauchements et les trous entre les polygones, un magnétisme (attirance d'un point sur un autre point ou segment) de 10 pixels a été défini. Une fois les polygones créés pour chaque date, les interprétations des occupations du sol ont été homogénéisées entre les différents collaborateurs.

Après avoir découpé les cinq dates selon la zone d'étude définie, une couche vecteur des communes a été récupérée sur le site de l'IGN et intersectée avec les couches d'occupation des sols. Lors de cette intersection, nous avons fait face à des problèmes de différence

de référentiels (Lambert 93 et WGS84) et de malfaçons de polygones. Les polygones de même nature ont été fusionnés par commune. Cela a permis de calculer les surfaces des différentes occupations des sols au sein de chaque commune et d'obtenir cinq premières cartes représentant l'occupation des sols par date (**Annexe 3**). Une fois unies deux à deux, elles permettent d'observer l'évolution de l'occupation des sols de date en date. Les surfaces ont été calculées à nouveau, et les polygones de moins de 0.1 ha ont été exclus de l'analyse : il s'agissait d'erreurs de tracé. La symbologie a été définie pour être la plus intuitive possible. Les types d'occupation des sols sont représentés par des couleurs pastel lorsqu'ils ne subissent pas d'évolution. Un changement d'occupation est représenté par des couleurs de saturation supérieures.

Des données concernant l'évolution de la démographie de 1962 à 2011 ont été récupérées sur des sites officiels (www.insee.fr; www.tout-sur-ma-commune.fr). Le recensement agricole a également été renseigné par commune (www.agreste.agriculture.gouv.fr). L'évolution démographique de la zone d'étude a ainsi été illustrée à l'aide d'histogrammes représentés sur une carte.

RESULTATS

- 1946-1961 : La surface recouverte par le matorral augmente d'environ 44 %. Cette augmentation est répartie sur l'ensemble de la zone d'étude (**Fig. 2**). De plus, des déprises agricoles et urbaines de plus de 20 % chacune, ainsi qu'une réduction de la surface forestière de 10 %, sont notables.

- 1961-1970 : Une nette expansion urbaine est constatée. La surface a été multipliée par deux. Nous pouvons aussi observer une réduction de la surface des parcelles agricoles de 20 %, du matorral de 15 % et celle des zones forestières de 5 %.

- 1970-1983 : Malgré l'expansion de la surface du lac, la progression des zones urbaines est du même ordre de grandeur que celle constatée entre 1961 et 1970, soit environ 50 %. Il faut tout de même noter que

la ville de Celles est partiellement submergée. Les zones forestières et le matorral augmentent respectivement de 5 et 6 %. Ces augmentations ne sont toutefois pas réparties de façon homogène sur la zone d'étude, la croissance du matorral étant principalement située sur les rives est et ouest du lac. De plus, la presqu'île de Rouens a subi un remaniement complet de son occupation du sol, celle-ci passant de matorral à forêt. La déprise agricole est quant à elle de 22 %.

- 1983-2001 : L'expansion de la ville continue et est estimée à 69 %. La forêt progresse quant à elle de 24 %, et les déprises des parcelles agricoles et des matorrals sont respectivement de 19 et 5 %.

L'évolution de la population pour les différentes communes présentes sur la zone d'étude de 1962 à 2011 a été représentée sur une carte (**Fig. 3**). Celle-ci permet de suivre l'évolution démographique en pourcentage, selon les relevés de l'INSEE, par rapport à la population de 1962 (considérée comme initiale). La population diminue de 1962 à 1975, puis augmente jusqu'en 2008. Il y a ensuite un ralentissement de la croissance démographique entre 2008 et 2011. Ce schéma se retrouve pour toutes les communes, excepté Lacoste où l'augmentation de la population est effective dès 1962.

DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence différents changements en lien avec l'évolution de la situation géo-socio-politique, comprenant la formation du barrage associée à la mise en eau du lac, l'évolution du pastoralisme et la déprise agricole.

Une importante déprise agricole est visible sur la période de l'étude. L'incertitude des métiers agricoles engendre une diminution du nombre d'exploitants. A cela s'ajoutent une augmentation du prix des terres agricoles (**Cavailhes et al., 2011**), et une croissance démographique urbaine consommant l'espace agricole par artificialisation croissante des milieux (**CETE Méditerranée, 2012**).

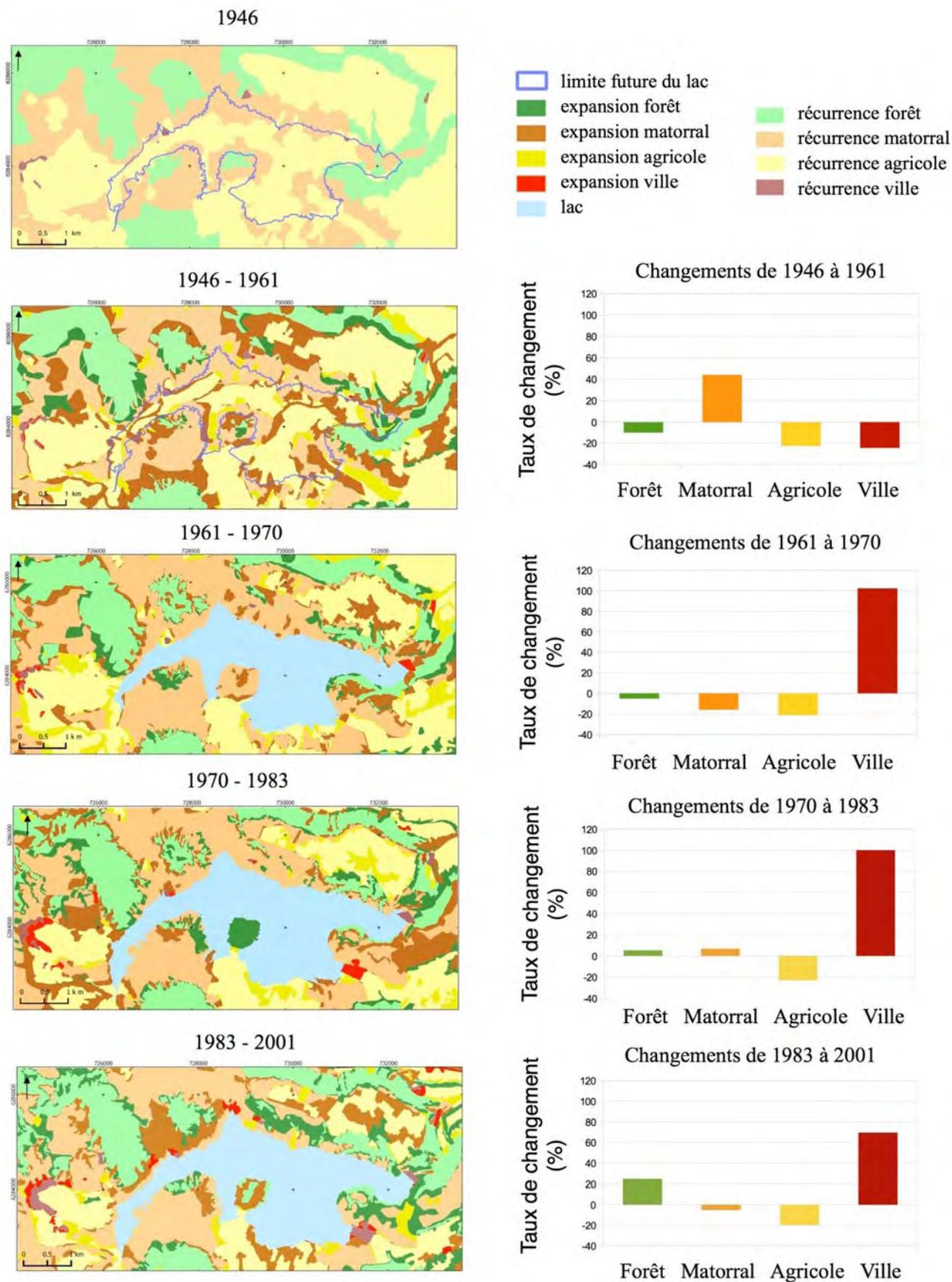


Figure 2. Evolution de l'occupation des sols de 1946 à 2001 (source : IGN, Association SIG-LR)

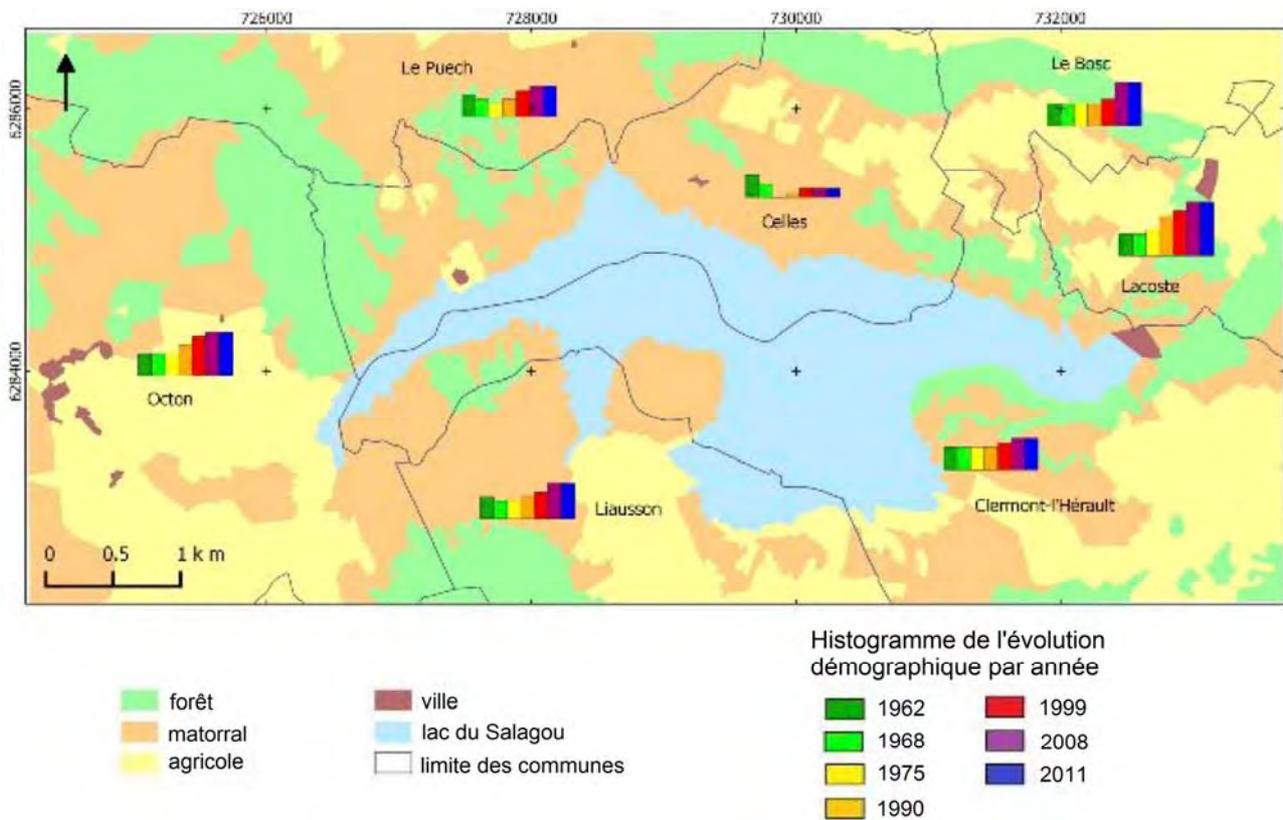


Figure 3. Evolution en pourcentages de la population par rapport à la population initiale de 1962 (source : IGN, Association SIG-LR)

Entre 1946 et 1961, l'augmentation de la surface recouverte par le matorral est certainement une conséquence de la déprise agricole : puisque les terres ne sont plus entretenues, le milieu tend à se refermer. De 1962 à 1968, cette déprise est corrélée à une diminution de la population rurale.

D'autre part, après 1969, la mise en eau du lac accentue la diminution du nombre de terres cultivées, car de nombreuses parcelles ont été en partie ou totalement submergées : le lac recouvre principalement des espaces anciennement agricoles ou de matorral.

Les surfaces urbaines étant peu importantes, la moindre différence de photo-interprétation impacte fortement le pourcentage d'évolution de ce type d'occupation du sol. La diminution des zones urbaines de 1946 à 1961 peut être expliquée par des différences de photo-interprétation. Par la suite (de 1961 à 2001), l'expansion urbaine est constante, malgré le recouvrement par les eaux de certains espaces bâtis. Cette augmentation est tout d'abord liée à la construction du barrage dès 1964, traité

en zone urbanisée dans notre étude. Elle est également liée au développement des zones urbaines, ainsi qu'à l'aménagement de zones touristiques autour du lac depuis 1970 (Annexe 3), ce qui se traduit par un accroissement de la population. Il est important de noter que la photo-interprétation est subjective. Ainsi, des zones qui sont identifiées comme urbaines peuvent être inhabitées et biaiser nos résultats. En prenant l'exemple de Celles, on constate que la surface de cette zone urbaine augmente entre 1970 et 1983. Cependant, cette expansion semble liée à des erreurs de photo-interprétation, puisque des recherches complémentaires et le suivi de l'évolution démographique de la commune ont révélé l'abandon de la zone précédant la mise en eau du lac.

Les fluctuations de l'occupation forestière sont proportionnellement moindres. Une augmentation du couvert forestier entre 1983 et 2001 traduit cependant une fermeture localisée du milieu. Ce changement pourrait

être lié à la politique de limitation des feux d'hiver par souci de protection de la biodiversité. Or le feu, souvent considéré comme néfaste par l'opinion publique, s'avère pourtant nécessaire à la préservation des paysages et écosystèmes méditerranéens. La pratique de l'écobuage consiste à brûler sur pied les végétaux grâce à des feux hivernaux contrôlés. Cette perturbation du milieu permet d'augmenter la diversité des habitats, en créant une mosaïque de milieux. Les zones sur lesquelles sont pratiqués les écobuages présentent ainsi une biodiversité importante (Syndicat mixte de gestion du Salagou, 2010 ; Faivre, 2011). La limitation de cette pratique, ainsi que la diminution du pastoralisme dans la région, sont deux causes de la fermeture des milieux. Ces explications sont confortées par les modifications observées au niveau de l'avifaune (P. Martin, comm. pers.). La fauvette pitchou (*Sylvia undata*) et l'alouette calandrelle (*Calandrella brachydactyla*), deux espèces inféodées aux milieux ouverts, sont localement menacées par la disparition de leurs habitats d'alimentation et de nidification (Syndicat mixte de gestion du Salagou, 2010).

La protection du lac du Salagou a dans un premier temps été permise par sa classification comme "Grand Site" en 2003, grâce à l'application de lois telle que celle du 2 mai 1930 sur "la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque" (www.grandsitedefrance.com). Dans un second temps, des législations propres ont également permis la protection du site, avec l'interdiction du camping-caravaning hors des aires équipées, l'obligation d'emporter ses déchets, l'interdiction des panneaux publicitaires, ou encore l'interdiction des bateaux à moteurs thermiques sur le lac. De plus, un ralentissement de l'accroissement démographique est observable entre 2008 et 2011. Ce phénomène peut s'expliquer par le pas de temps court entre ces deux dates, ou encore par le fait que cette zone vise à être classée "Grand Site de France". En effet, pour avoir droit à cette appellation, la communauté de communes limite depuis 2006 l'expansion

urbaine et le "mitage", c'est à dire les constructions isolées sur la zone (CAUE de l'Hérault, 2009).

CONCLUSION

Les cartes illustrant l'évolution de l'occupation des sols de 1946 à 2001 ont permis de mettre en évidence l'impact de la mise en eau du lac sur les changements d'occupation des sols autour du lac du Salagou. Une déprise agricole est constatée, en lien avec la diminution du nombre d'agriculteurs et la mise en eau de nombreuses parcelles. De plus, les expansions urbaines et démographiques après les années 1970 apparaissent essentiellement dues au développement des activités touristiques de la région et à l'augmentation de la population. Enfin, l'arrêt de la pratique de l'écobuage et la déprise pastorale engendrent un début de fermeture du milieu. Une étude approfondie de l'évolution de la biodiversité du site pourrait compléter cette étude. Elle permettrait de mesurer l'impact de l'évolution de l'occupation des sols sur la richesse spécifique.

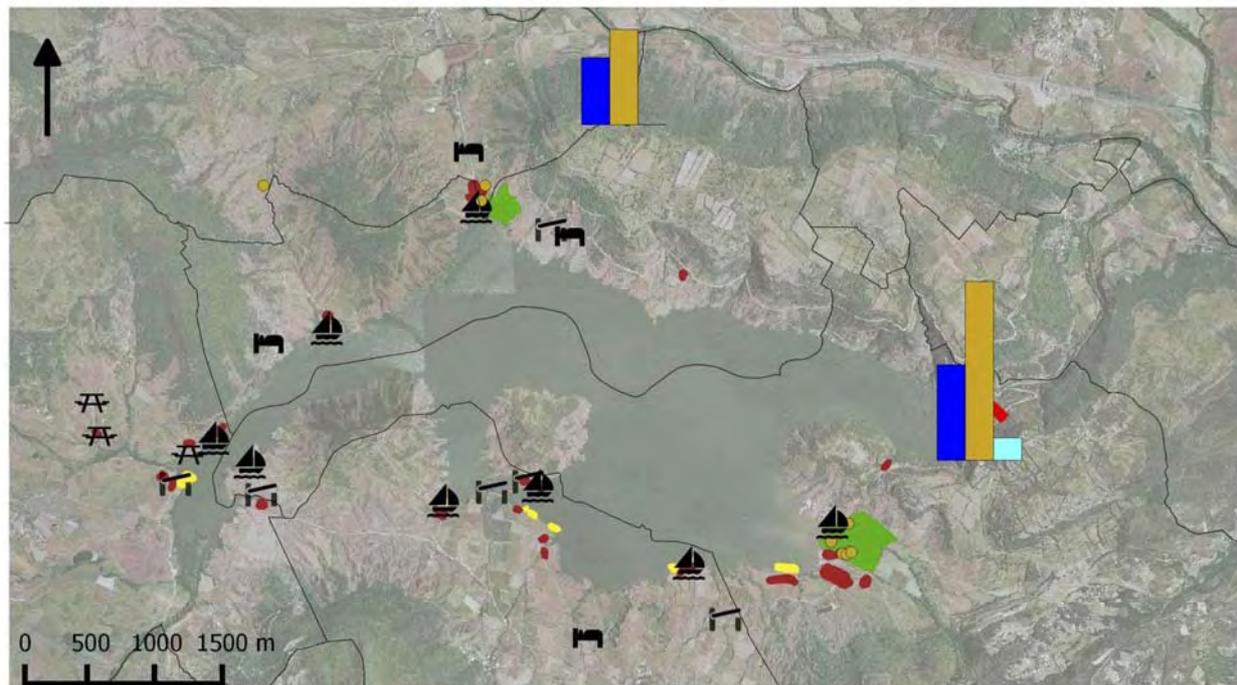
REFERENCES

- CAUE – Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de l'Hérault (2009). *Une Charte pour l'architecture, l'urbanisme et les paysages*. Conseil général de l'Hérault, Montpellier, 12 p.
- CAUE – Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de l'Hérault (2010). *Guide de recommandations de la Charte pour l'architecture, l'urbanisme et les paysages*. Syndicat Mixte de Gestion du Salagou, Clermont-l'Hérault, 142 p.
- Cavailhes J., Mesrine A. & Rouquette C. (2011). Le foncier agricole, une ressource sous tension. *Économie et statistiques*, 8 : 444-445.
- CETE Méditerranée – Centre d'Études Techniques de l'Équipement (2012). *Construire un projet de réservation de l'espace et de développement de l'activité agricoles : Guide méthodologique*. DDTM du Var, Toulon, 141 p.

- Collectif des Garrigues (2013). *Atlas des garrigues, regards croisés*. Écologistes de l'Euzière, Prades-le-Lez, 360 p.
- Conolly J. & Lake M. (2006). *Geographical Information Systems in Archaeology*. Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge, 338 p.
- Faivre N. (2011). Which pyrodiversity for what biodiversity? A multi-scale comparative study of two Mediterranean ecosystems. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille 3, 174 p.
- Leprince S., Barbot S., Ayoub F. & Avouac J.P. (2007). Automatic and precise ortho-rectification, coregistration, and sub pixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 : 1529-1558.
- Musset F., Ribault A. & Viot N. (2002). *Historique des crues dans le bassin de l'Hérault*. Ecole nationale supérieure des mines, Saint-Etienne, 33 p.
- Syndicat mixte de gestion du Salagou (2010). *DOCOB de la ZPS « Le Salagou »*. Syndicat mixte de gestion du Salagou, Clermont-l'Hérault, 241 p.

ANNEXE 1.

Représentation de la répartition des zones de loisirs ainsi que la proportion des activités proposées (source: www.tourisme-lodevois-larzac.com)



 barrage

Aménagements

 aménagement routier

 aménagement urbain

 gîte

 loisir

 nautique

 terrestre

Occupation

 parking

 plage

 camping

HISTOGRAMME nombre d'activités

 activités aériennes

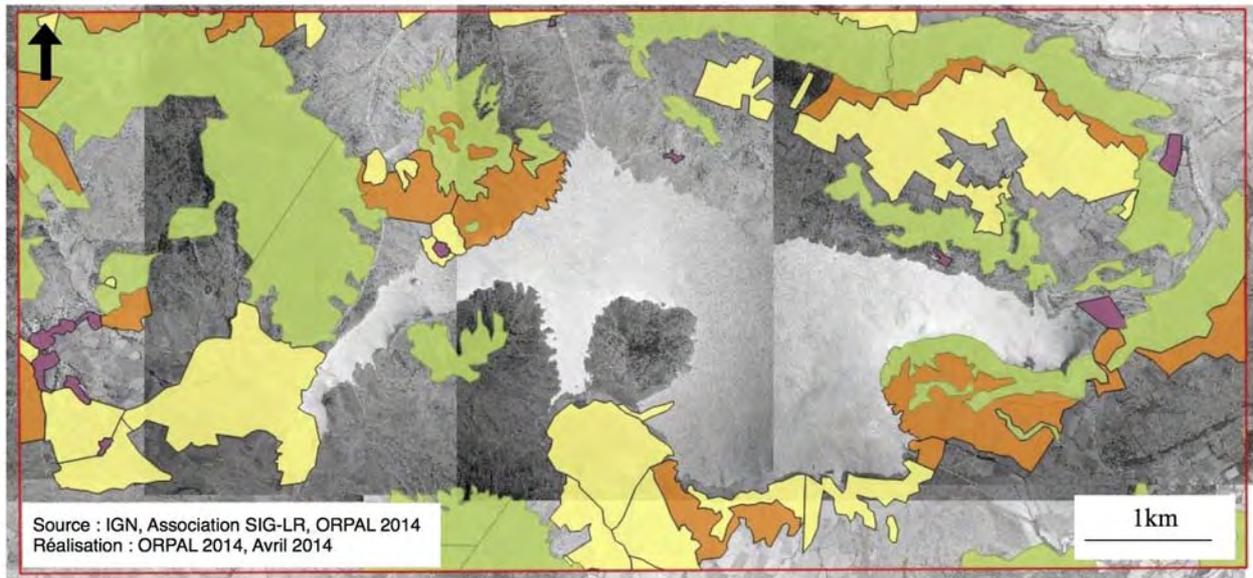
 activités terrestres

 activités nautiques

Source : www.tourisme-lodevois-larzac.com, ORPAL 2014
Réalisation : ORPAL 2014, Avril 2014

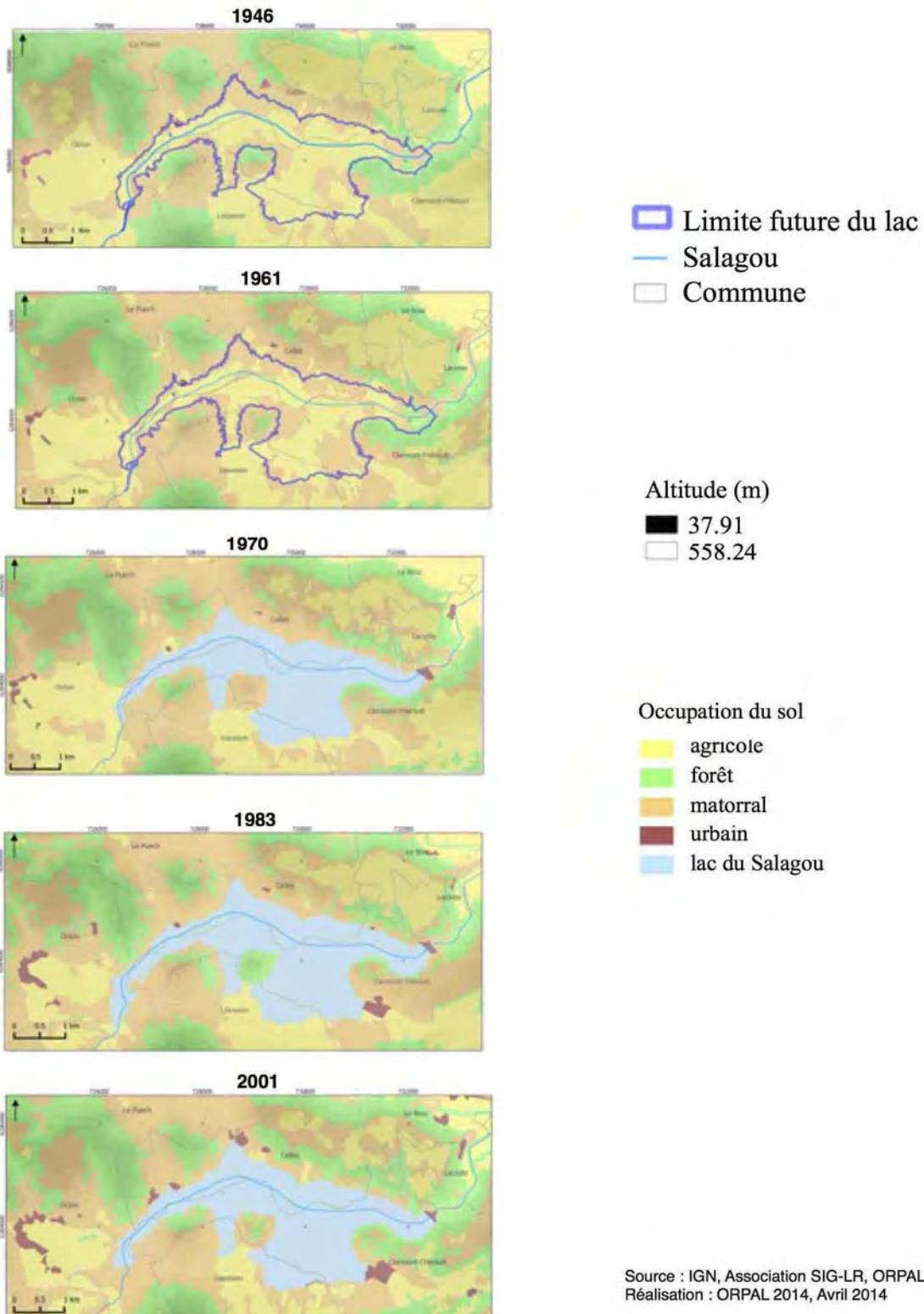
ANNEXE 2.

Exemple d'une photo-interprétation sur une mosaïque d'images précédemment géo-référencées. Chaque couleur de polygones représente un type d'occupation du sol. Le cadre rouge représente le périmètre de la zone d'étude.



ANNEXE 3.

Occupation du sol de la zone d'étude par date (Lac du Salagou) (source: www.siglr.org)



RECONSTITUTION DE 50 ANS D'HISTOIRE DE LA SEDIMENTATION D'UN LAC D'ORIGINE ANTHROPIQUE (LAC DU SALAGOU)

Jeremy Dayde ¹, Jeremy Detrey ², Guillaume Fort ³

Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie

Institut de Botanique, 163 Rue Auguste Broussonet, 34090 Montpellier, France

¹ jeremy.dayde@etud.univ-montp2.fr, ² jeremy.detrey@etud.univ-montp2.fr,

³ guillaume.fort@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Vincent Girard et Laurent Bremond

Citation : Dayde J., Detrey J. & Fort G. (2014). Reconstitution de 50 ans d'histoire de la sédimentation d'un lac d'origine anthropique (lac du Salagou). *Orpal Synthesis*, 7 : 19-26.

Résumé : Le lac du Salagou est un lac anthropique. Des carottages sédimentaires le long d'un transect Ouest - Est ont permis, par diverses méthodes (perte au feu, susceptibilité magnétique, granulométrie), de retracer son histoire récente. Une forte proportion de carbone organique par rapport au carbone inorganique est mise en évidence. Les variations de susceptibilité magnétique et une hétérogénéité des composants dans le sédiment permettent de corréler certaines couches et de mettre en évidence des épisodes de fortes pluies. Le lac Salagou est un milieu calme, mais de fortes crues ont pu influencer la structure et la composition du sédiment.

Mots clés : milieu lacustre, perte au feu, susceptibilité magnétique, granulométrie, paléoenvironnements

Abstract: *Reconstruction of 50 years of sedimentation history of an artificial lake (Salagou Lake)*. Salagou Lake is an anthropogenic lake. Core samples, realised along a west-east transect, allowed reconstructing its recent history through various analyses (loss on ignition, magnetic susceptibility and grain size distribution). A high rate of organic carbon is revealed in relation to inorganic carbon rate. Magnetic susceptibility variations associated to sediment-size heterogeneity in the samples allow establishing correlations between certain layers and evidencing strong rainfall episodes. Salagou Lake is a quiet environment, but some severe flood episodes would have affected the structure and composition of sediment.

Keywords : lake environment, loss on ignition, magnetic susceptibility, grain size distribution, palaeoenvironments

Les lacs ont deux sources potentielles d'apport en eau et donc en sédiments (si on exclut la très faible part éolienne) : les rivières et les eaux de ruissellement. Ces deux types d'apports assurent le transport de substances minérales et organiques depuis les bassins versants (Ackermann et al., 1973) vers les

lacs. L'étude des sédiments préservés dans ces derniers permet de connaître des paléoenvironnements et de comprendre les événements passés (crues, sécheresses, etc.). Le mode de dépôt des particules (par gravité) fait que les sédiments de taille importante se trouvent en bordure du lac ou à proximité du débouché de la rivière, car ils nécessitent une

forte intensité du courant pour être transportés. Les éléments les plus fins se déposent au fur et à mesure que l'intensité diminue, donc généralement vers le centre du lac.

Le lac du Salagou a été construit suite à des crises viticoles qui ont amené les pouvoirs publics à envisager une reconversion des vignobles en terrains agricoles. La création du lac avait pour but d'irriguer les cultures agricoles des terres environnantes. Le site du Salagou a été choisi en raison des fortes crues provenant de la rivière Salagou, qui permettent de remplir ce réservoir d'eau, mais aussi pour sa position géographique et son relief, et notamment pour la nature imperméable du sol, permettant l'instauration d'un lac artificiel. La mise en eau du lac a eu lieu en 1968-1969 suite à la création d'un barrage. Trois ans après sa construction, son niveau d'eau actuel a été atteint. La mise en eau initiale a été excessivement rapide puisqu'en mars 1969, après trois jours de pluies torrentielles, le lac s'est rempli de moitié. De nos jours, il s'agit d'un lieu touristique qui est également utilisé dans la lutte contre les incendies.

Le lac du Salagou n'a jamais été vidé depuis sa création. On peut ainsi considérer que la colonne d'eau est la même depuis 50 ans, ces conditions de sédimentation peuvent donc nous permettre d'observer l'histoire des crues de la rivière Salagou. Son remplissage sédimentaire doit avoir enregistré l'histoire du lac au cours des 50 dernières années. L'analyse de ces dépôts devrait permettre d'obtenir une première idée de cette histoire, et d'évaluer l'intensité des crues de la rivière Salagou (fréquentes avant la mise en eau du lac) jusqu'à aujourd'hui

MATERIEL ET METHODES

1- Site d'étude

Le lac du Salagou est un lac artificiel, atteignant 40 m de profondeur avec une superficie de 750 ha. Il est situé au centre du département de l'Hérault, sur la rivière Salagou qui est donc sa principale source d'apport de sédiments. Son encaissant est

constitué de ruffe, roche d'âge permotriassique formée par la combinaison de sédiments argileux et d'oxydes de fer. Son bassin versant est situé à l'est, caractérisé par une plaine intensivement exploitée par l'agriculture.

2- Prélèvement du sédiment et préparation des échantillons

Les prélèvements de sédiments lacustres ont été réalisés en janvier, selon un transect Ouest-Est c'est-à-dire depuis l'embouchure de la rivière Salagou vers le barrage. 8 prélèvements ont permis d'obtenir un transect en fonction de l'éloignement de l'embouchure de la rivière (Fig. 1). Pour cette étude, nous n'avons étudié que 7 de ces prélèvements en raison du manque de matériel dans le premier. Pour réaliser les prélèvements, nous avons utilisé un carottier Kajak-Brinkhurst (KB) lâché depuis une embarcation gonflable. Les positions géographiques des différents prélèvements ont été recueillies à l'aide d'un GPS. La profondeur à laquelle les sédiments ont été prélevés a aussi été mesurée. Chaque carotte obtenue a été découpée cm par cm, et mise dans des sachets individuels afin de pouvoir étudier séparément chaque couche de sédiments.

Des échantillons de surface ont en outre été prélevés : (1) le long de la rivière Salagou (RIVE) afin d'en préciser le type d'apport, (2) dans le bassin versant, et (3) sur une pente montagneuse faisant partie du massif calcaire de Salasc.

3- Mesure de la teneur en carbone par perte au feu

La méthode de la perte au feu permet d'évaluer le taux de carbone organique et inorganique présent dans le sédiment. Le carbone organique représente les apports en carbone d'origine animale ou végétale, et le carbone inorganique, les apports en carbone d'origine minérale. Il est ainsi possible de mettre en évidence l'origine du sédiment minéral (autochtone ou allochtone), c'est-à-dire s'il provient du bassin versant ou des cirques dolomitiques.

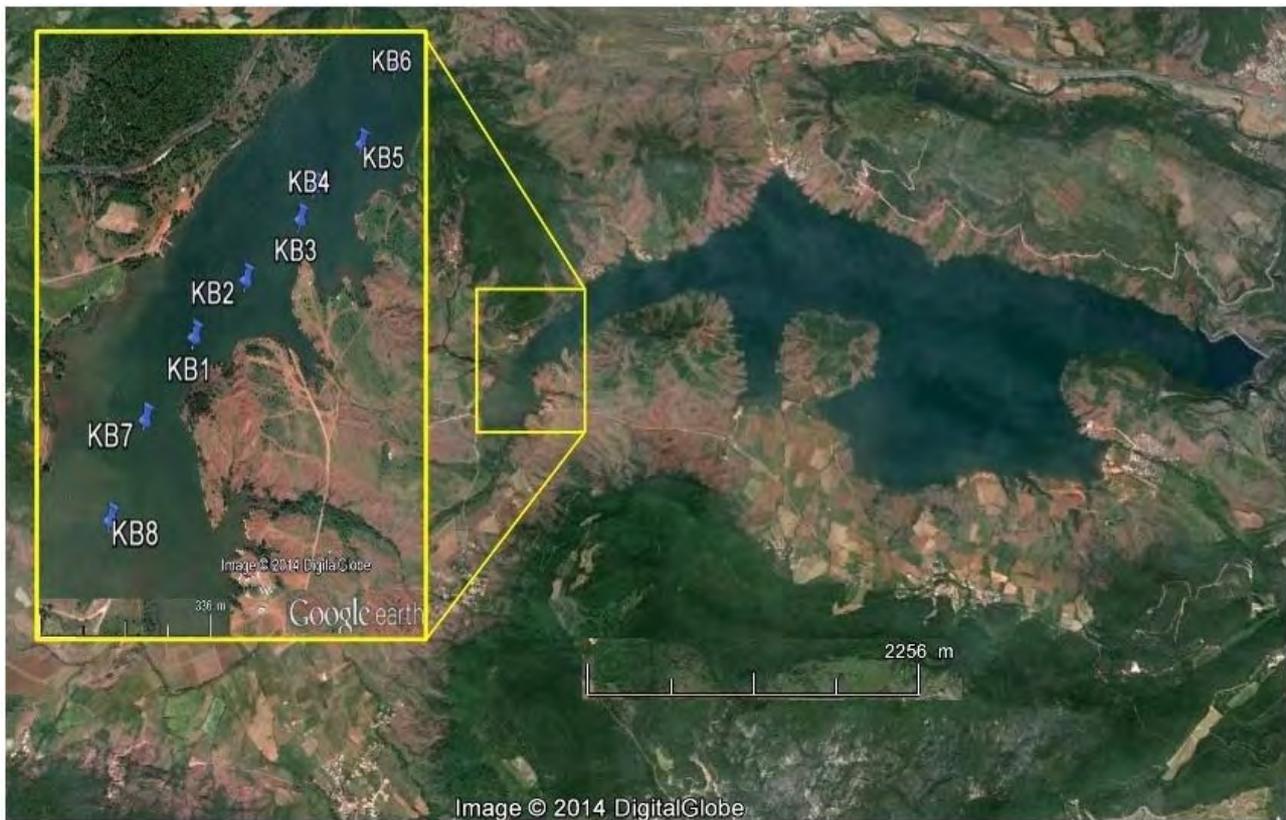


Figure 1. Localisation des carottages sur la photo satellite du lac du Salagou (source : Google Earth, 2014)

Pour chaque centimètre de chaque carotte, 5 cm³ de matériel ont été prélevés et placés dans un creuset préalablement séché pendant une heure à 105°C, et pesé à la balance de précision (afin de servir de tare pour la suite des mesures). Les échantillons ont ensuite été placés dans un four à 105°C pendant 12 heures afin de faire évaporer l'eau du sédiment. Une fois séchés, les échantillons ont ensuite été placés à 550°C durant 5 heures afin de brûler le carbone organique puis à 950°C durant 2 heures afin de brûler le carbone inorganique. Après chaque passage au four, les échantillons ont été pesés afin d'être comparés à la tare et à la mesure de poids précédente. Cette méthode permet d'estimer le poids perdu après les différentes étapes de chauffe. Seuls trois carottages (KB 3, 6 et 8) ont été analysés en perte au feu car le four ne permettait pas, en un temps relativement court, d'analyser plus d'échantillons.

4- Test de susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique de chaque échantillon a été mesurée, grâce à la présence de minéraux magnétiques dans le sédiment (Thomson & Oldfield, 1986), afin de corréliser les différents prélèvements. Seul le premier centimètre n'a pas été analysé car le matériel était trop liquide et ne nécessitait pas de corrélation (par définition, ils sont contemporains). Dans un tube en plastique amagnétique, 3 cm³ de sédiment ont été prélevés. La susceptibilité magnétique a été mesurée sur des échantillons humides puis secs, afin d'éviter tout problème lié au magnétisme potentiel de l'eau.

Cette analyse permet d'identifier les couches sédimentaires afin de les corréliser entre elles à l'aide des indices laissés par les événements climatiques dans le sédiment.

5- Analyse granulométrique

Pour estimer les proportions des différents diamètres de particules présentes dans le sédiment, une analyse granulométrique a été

effectuée. Pour réaliser cette étude, 5 cm³ de matériel ont été récoltés pour les KB 3, 6 et 8 (par manque de temps, les autres KB n'ont pu être analysés). Ces KB ont été sélectionnés pour être comparés avec les données de perte au feu. Chaque échantillon a été tamisé dans une colonne de 5 tamis de taille 2 mm, 1 mm, 315 µ, 150 µ et 50 µ. Nous avons évalué la proportion dans le sédiment des grosses et moyennes particules (2 et 1 mm ; pierres, graines, etc.), de sable grossier et micro-organismes (315 µ), de sable fin (150 µ) de limon (50 µ), et d'argiles (<50 µ). Pour chaque catégorie de "grain", les poids secs ont été calculés et traités en pourcentage de masse.

RESULTATS

1- Perte au feu

Les résultats des mesures de perte au feu sont présentés **Figure 2**. La quantité de carbone organique obtenue est très largement supérieure à la quantité de carbone inorganique. On constate une diminution du carbone organique et inorganique en profondeur pour les KB 3 et 8, avec un léger pic des deux carbones pour des profondeurs comprises entre 3 et 5 cm. Pour ces deux KB, on observe une corrélation négative entre la quantité de carbone présente dans le sédiment et la profondeur. Pour le KB6, on observe très peu de variation de la quantité de carbone organique en fonction de la profondeur : seule une légère diminution du carbone organique entre 5 et 7 cm de profondeur est observable. Le carbone inorganique semble lui diminuer très progressivement avec la profondeur.

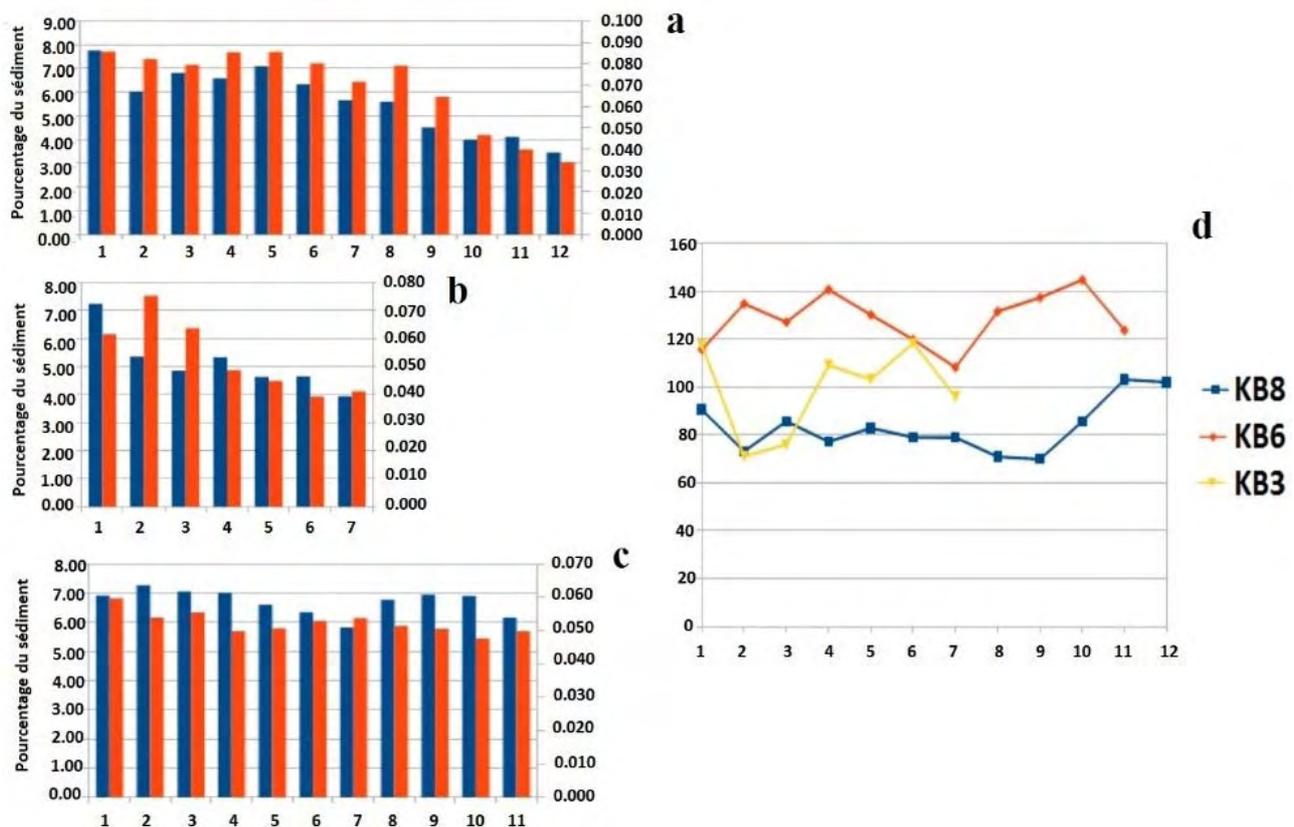


Figure 2. Proportions de carbone organique (histogrammes bleus, axes gauches) et inorganique (histogrammes rouges, axes droits) en fonction de la profondeur pour les KB8 (a), KB3 (b) et KB6 (c), et représentation du rapport C org. / C inorg. en fonction de la profondeur pour les KB8, 3 et 6 (d).

Le rapport carbone organique / carbone inorganique montre des variations très différentes en fonction des KB. Il est maximal pour le KB6 et minimal pour le KB8. Pour ce dernier, on observe peu de variation, sauf pour les niveaux plus profonds où une légère augmentation est observable. Pour le KB3, un pic négatif du rapport est visible pour les niveaux superficiels, tandis que les niveaux plus profonds sont marqués par un rapport plus haut. Enfin, le KB6 a un rapport assez fluctuant, mais restant toujours autour de la valeur 130. Seul un pic négatif est observable vers 7 cm de profondeur.

2- Susceptibilité magnétique

Les résultats des mesures de susceptibilité magnétique (Fig. 3) permettent d'observer les variations de la susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur pour chaque KB. Tous les KB montrent des valeurs similaires et très peu de variation. On peut néanmoins voir pour les KB 2, 5 et 8 une nette augmentation sur les derniers centimètres de la carotte.

3- Granulométrie

Les résultats des mesures de granulométrie (Fig. 4) représentent la proportion de taille de chaque grain en fonction de la profondeur pour chaque KB. On remarque que pour les 3 KB, la majeure partie du sédiment est constituée de grains inférieurs à 50 μ , comme pour le KB6 qui est composé de plus de 90 % d'argile sur chaque cm de la carotte. Pour le KB3, la fraction fine diminue en profondeur pour laisser place à des particules plus grosses. Pour le KB8, on remarque une baisse de la quantité d'argile entre 7 et 9 cm de profondeur.

DISCUSSION

Nous allons ici nous intéresser à l'histoire de la sédimentation du lac du Salagou à partir d'une corrélation stratigraphique permettant de mettre en évidence des couches contemporaines, ayant donc subi les mêmes événements.

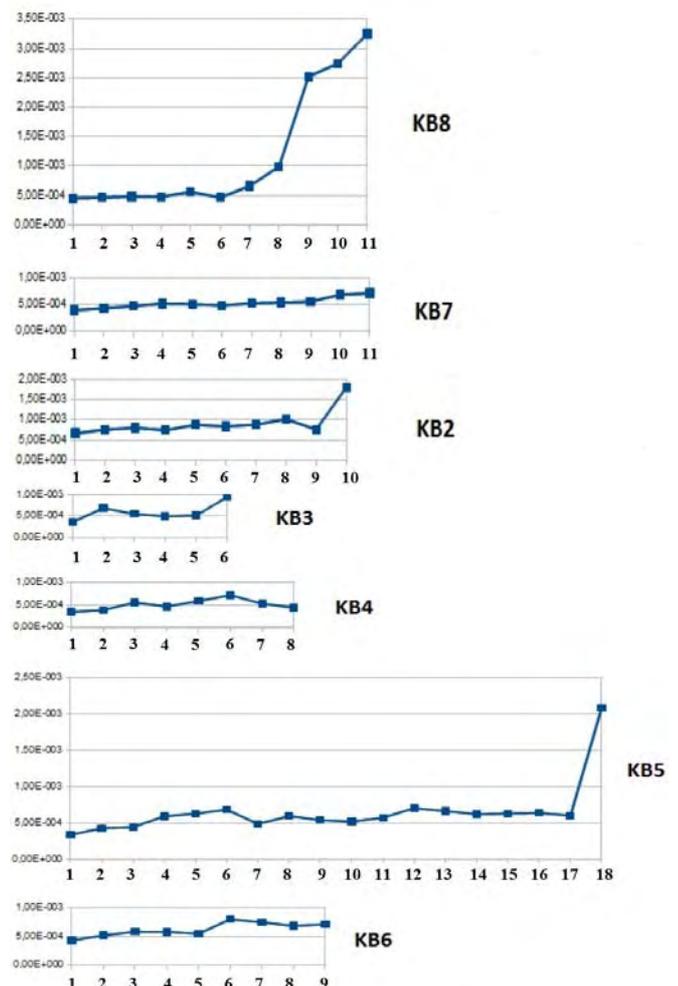


Figure 3. Susceptibilité magnétique enregistrée pour chaque KB, depuis l'embouchure (KB8) vers le lac (KB6)

1- Corrélation stratigraphique

L'analyse comparée de plusieurs prélèvements issus d'un même site nécessite de pouvoir croiser et connaître l'âge précis de chacun des prélèvements. Dans le cas de l'étude du Lac Salagou, les seules dates disponibles sont celles des couches de surface (entre 0 et 1 cm) qui, par définition, se déposent en ce moment et sont donc contemporaines. En ce qui concerne les couches plus profondes, aucune donnée n'est disponible. Par exemple, les données granulométriques montrent des tailles de grains différentes entre les 3 KB pour des mêmes profondeurs. Ceci suggère que les dépôts des différentes couches analysées ne sont pas tous contemporains pour une même profondeur.

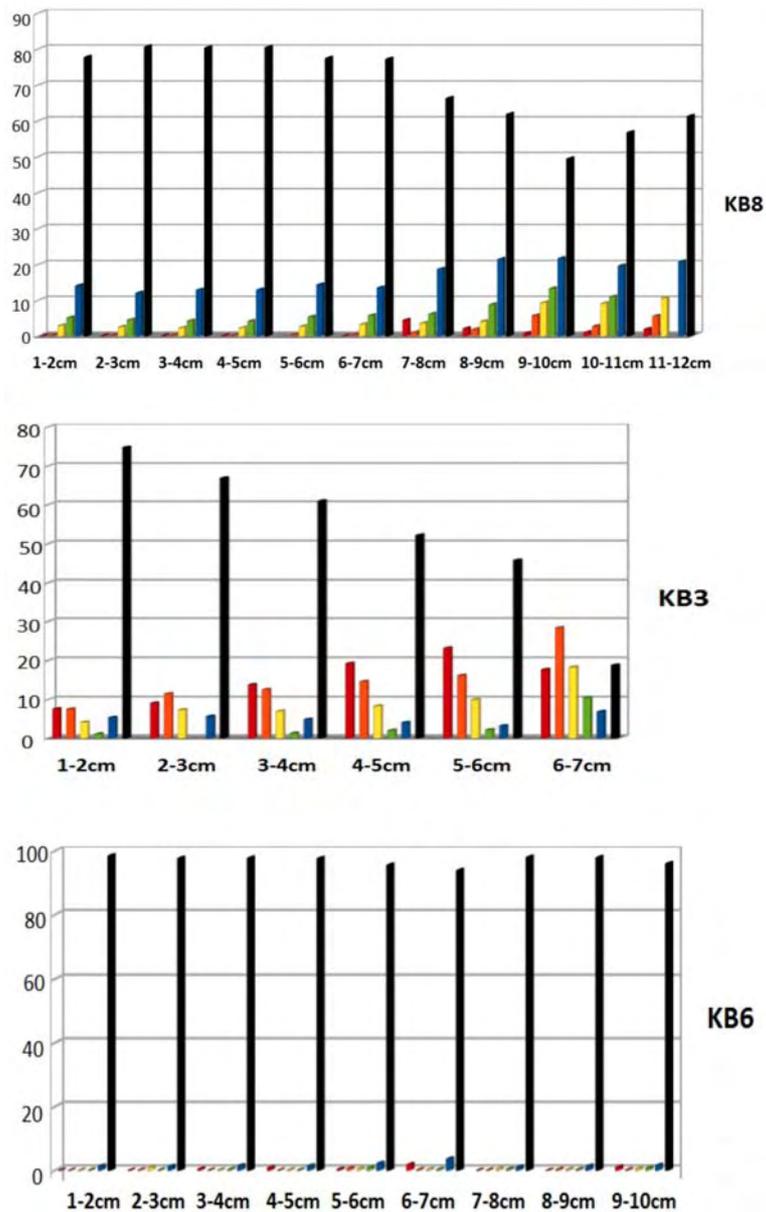


Figure 4. Proportion des particules retenues par les tamis pour les KB 3, 6 et 8, selon la taille des mailles : 2 mm en rouge ; 1 mm en orange ; 315 μ en jaune ; 150 μ en vert ; 50 μ en bleu. L'histogramme noir représente le pourcentage d'argile et d'eau constituant le sédiment.

En revanche, différents indices permettent de proposer de possibles corrélations entre les différents KB réalisés. Pour les KB 2, 5 et 8, les pics de susceptibilité magnétique sur les derniers centimètres des carottes (Fig. 3) peuvent témoigner du fond rocheux du lac qui représenterait la couche de la surface en 1968-1969 (c'est-à-dire avant que le lac ne se remplisse). Ces niveaux seraient contemporains entre eux et remonteraient à la mise en eau du lac. Le fond rocheux du lac est atteint à des profondeurs différentes selon les KB, témoignant des différentes conditions de

sédimentation selon la position du point considéré par rapport au bassin versant. En effet, on remarque ici que plus le point de carottage est éloigné du bassin versant, et plus le fond rocheux du lac est profond. On peut en outre supposer que plus on s'éloigne du bassin versant, et plus le courant perd en intensité, diminuant ainsi l'agitation de l'eau et permettant au matériel présent dans la colonne d'eau de se déposer de manière plus efficace. Le sédiment ne se dépose donc pas de manière homogène dans le lac. C'est pourquoi les carottes atteignant le fond

rocheux du lac ne sont pas toutes de même taille selon leur position dans le lac (éloignement du bassin versant).

Lorsque l'on compare les résultats de la perte au feu (Fig. 2) et de la granulométrie (Fig. 4), on peut mettre en évidence des événements importants, enregistrés dans le sédiment. On remarque une correspondance entre les KB 3, 6 et 8 pour les profondeurs respectives de 6, 6 et 9 cm. Le faible taux de particules fines dans la constitution du sédiment (Fig. 4) et les pics dans le rapport carbone organique/carbone inorganique (Fig. 2) révèlent un événement de forte activité dans la colonne d'eau, pouvant correspondre à une crue de la rivière Salagou. Cet événement pourrait correspondre à la crue de 1999 (Musset et al., 2002) et constituer un niveau repère, permettant de corréliser les différents KB.

2- Histoire de la sédimentation du Lac Salagou

La forte proportion de sédiments fins dans chaque KB (Fig. 4) témoigne d'un milieu de sédimentation relativement calme. En effet, les particules fines sont amenées par les courants d'eau et se déposent par gravité lorsque l'énergie du milieu devient faible ou nulle (Lagabrielle et al., 2005). La diminution de cette quantité d'argile en profondeur pour les KB 3 et 8 traduit une diminution de l'activité de la colonne d'eau dans le temps. Le KB 8 renseigne sur cette évolution depuis la mise en eau, puisque cette carotte sédimentaire atteint le substrat. De ce fait, on se rend compte que la mise en eau du lac a été relativement violente puisque c'est dans les couches les plus profondes (8-12 cm) que l'on trouve les particules les plus grosses, alors que dans les couches plus récentes leur pourcentage est inférieur à 5 %.

Les données issues de l'analyse granulométrique du KB 6 (Fig. 4) et sa forte concentration en argile sur toute l'épaisseur de sédiment témoignent de conditions calmes dans la colonne d'eau permettant le dépôt des plus petites particules. Le fait que cette concentration et les quantités de carbone soient assez constantes témoigne de

l'homogénéité des conditions de sédimentation depuis la date correspondante à la couche la plus profonde (10 cm). Cette couche ne représente malheureusement pas la couche de mise en eau, car il n'y a pas de pic important de susceptibilité magnétique pour ce KB.

On constate que le carbone présent dans le sédiment est très majoritairement d'origine organique (Fig. 2). L'apport de matériel depuis le cirque dolomitique présent dans le bassin versant est très faible. On peut donc en déduire que l'essentiel du matériel sédimentaire du lac est apporté par démantèlement des ruffes, grâce aux précipitations et au ruissellement. Le sédiment lacustre est constitué de la dégradation de la ruffe, avec de la matière organique apportée par la rivière et les pluies ou produite par les organismes présents dans le lac. Le carbone organique reflète la quantité de microorganismes morts présent dans le lac (Meyers & Ishiwatari, 1993) ou vivants directement dans le sédiment (bivalves) (Wang et al., 2014). De plus, il pourrait aussi attester les apports de carbone organique exogène, c'est-à-dire toute matière organique d'origine animale et végétale apportée par le bassin versant et par les pluies.

CONCLUSION

Cette étude a permis de relier certaines couches contemporaines et de déterminer un historique des conditions de sédimentation, grâce à l'analyse du sédiment selon trois méthodes que sont la perte au feu, la susceptibilité magnétique et la granulométrie. La corrélation des résultats des différentes analyses a permis de définir le fond du lac sur certains KB (couches correspondantes aux sédiments déposés en 1968-1969). L'épaisseur des sédiments n'est pas homogène sur tout le fond du lac, ce qui traduit l'existence de différentes conditions de sédimentation. Nous avons réussi à établir que l'origine du matériel minéral était le bassin versant, par dégradation des ruffes, les carbonates présents dans les dolomies de Salasc (accolées au bassin versant) ne fournissant que très peu de matériel minéral. Certaines couches peuvent

êtres reliées à un même événement, tel qu'une crue, agissant ainsi sur la composition du sédiment à ces profondeurs. Les profondeurs de 6, 6 et 9 cm, pour les KB 3, 6 et 8, pourraient donc être assignées à une crue (1999 ?) ayant eu un important impact sur les conditions de sédimentation du lac.

Le lac du Salagou est un site intéressant pour la reconstitution des paléoenvironnements récents, puisqu'il permet de mettre en évidence des événements passés susceptibles d'avoir eu un impact sur la région. Il serait intéressant de connaître la dynamique des courants au sein du lac afin d'avoir une idée des lieux où le dépôt de sédiment est facilité, et de pouvoir faire des prélèvements avec un objectif précis. De plus, il serait intéressant de réaliser plus de prélèvements, afin de relier chronologiquement les résultats obtenues par ces méthodes, avec les données pluviométriques et historiques des crues (source : Météo France) dans le but d'établir une corrélation entre les différentes couches des carottes de sédiment.

RÉFÉRENCES

- Ackermann W.C., White G.F., Worthington E.B. & Ivens J.L. (1973). Man-made lakes: Their problems and environmental effects. *In* : F.M. Dendy, W.A. Champion & R.B. Wilson (éds.), *Reservoir Sedimentation Surveys in the United States*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 5-7.
- Lagabrielle Y., Pomerol C. & Renard M. (2005). *Éléments de géologie. Les enveloppes fluides de la planète Terre : climat, paléoclimats, océanographie*. Dunod, Paris.
- Meyers P.A. & Ishiwatari R. (1993). Lacustrine organic geochemistry - an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 20 : 867-900.
- Musset F., Ribault A. & Viot N. (2002). *Historique des crues dans le bassin de l'Hérault*. Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne.
- Thomson R. & Oldfield F. (1986). *Environmental magnetism*. Allen & Unwin, London.
- Wang Y., Yang H., Zhang J., Gao W., Huang C. & Xie B. (2014). Characterization of n-alkanes and their carbon isotopic composition in sediments from a small catchment of the Dianchi watershed. *Chemosphere*. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.085

REFERENTIEL DES DIATOMEES ET DES CHARBONS PRESENTS DANS LE SEDIMENT SUBACTUEL DU LAC DU SALAGOU

Lucie Mato ¹, Lauriane Navarro ², Fanny Santucci ³

*Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie
Institut de Botanique, 163 Rue Auguste Broussonet, 34090 Montpellier, France*

¹ lucie.mato@etud.univ-montp2.fr, ² lauriane.navarro@etud.univ-montp2.fr,

³ fanny.santucci@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Laurent Bremond et Vincent Girard

Citation : Mato L., Navarro L. & Santucci F. (2014). Référentiel des diatomées et des charbons présents dans le sédiment subactuel du lac du Salagou. *Orpal Synthesis*, 7 : 27-37.

Résumé : Le lac du Salagou est un lac anthropique créé par un barrage construit en 1969. Ce lac est naturellement alimenté par la rivière du même nom. Afin de comprendre les modes de dépôts de certains bio-proxies permettant la reconstruction des paléoenvironnements autour des lacs, nous avons mis en place un référentiel à partir des dépôts récents. Pour cela, nous avons analysé plusieurs bio-proxies (charbons sédimentaires et diatomées) spatialement, en fonction de la distance à la source et de leur profondeur dans les sédiments.

Mots clés : bio-proxy, paléoenvironnements, charbons, diatomées

Abstract: *Reference study of diatoms and charcoals present within the recent sediment of Lake Salagou.* Lake Salagou is an anthropogenic lake created by a dam built in 1969. That lake is naturally filled by a river bearing the same name. In order to understand the depositional processes of certain bioproxies enabling the reconstruction of the palaeoenvironments around lakes, we created a reference document from recent deposits. Therefore, we analysed several bio-proxies (charcoals and diatoms) spatially, by taking into account the distance from the source and to the depth in the sediments.

Key words: bio-proxy, palaeoenvironments, charcoals, diatoms

Le lac du Salagou (Hérault) est un lac artificiel situé à 50 km à l'ouest de Montpellier. Il a été mis en eau dans les années 60, pour alimenter en eau la vallée et réduire l'intensité des crues du fleuve Hérault. Les alentours du lac sont caractérisés par la couleur rouge typique de la roche que le lac a ennoyé. Il s'agit d'une ruffe, c'est-à-dire des pélites d'âge permotriassique (Dumont, 2013).

L'étude des paléoenvironnements permet d'ajouter une composante dynamique à la compréhension des écosystèmes actuels. L'étude du temps long permet de caractériser les perturbations anthropiques ou naturelles, la réponse de l'écosystème et sa fragilité, et de définir par exemple sur ces bases les moyens à mettre en place pour le protéger. Cependant, même s'il existe de nombreux outils (ou bio-proxies) pour permettre ces reconstructions, très peu d'études se sont

intéressées au mode de dépôt de ces bio-proxys.

Afin de comprendre le mode de dépôts de certains bio-proxys qui se déposent dans le lac du Salagou, différents outils et méthodes ont été utilisés. Pour cette étude, deux bio-proxys ont été étudiés. Les diatomées sont des algues sensibles aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau et donc de bons indicateurs de la qualité de l'eau (Bourrelly, 1981) et du budget hydrique du lac (précipitations/évaporations), ce dernier étant influencé par les conditions climatiques (Nguetsop et al., 2010). Les charbons sont des fragments carbonisés d'origine végétale, qui permettent la reconstruction des feux, naturels ou anthropiques, qui ont eu lieu autour des lacs (Allée et al., 2006). Cette étude se propose d'analyser et comparer les bio-proxys contenus dans plusieurs prélèvements de l'interface eau-sédiment. L'analyse spatiale et temporelle des données devrait permettre de comprendre le mode de dépôt des bio-proxys et leur potentialité en tant que marqueurs paléoenvironnementaux.

MATERIEL ET METHODES

1- Présentation du site

Les paysages du lac du Salagou se caractérisent par des sols de couleur rouge. Ces sols sont constitués par la ruffe, roche sédimentaire pelitique d'âge permo-triasique. Sa couleur rouge provient de l'oxydation du fer. Ces dépôts sont d'origine continentale, comme en témoignent de nombreux fossiles ou empreintes (Dumont, 2013).

Le lac, créé par la mise en place d'un barrage dans les années 60, se situe à environ 140 m d'altitude et s'étend sur à peu près 7 km². Il atteint 40 m de profondeur et contient environ 102 millions de m³ d'eau.

2- Protocole d'échantillonnage

Lors du stage de terrain qui a eu lieu du 22 au 24 Janvier 2014, des prélèvements ont été réalisés sur un transect d'environ 1 km, depuis l'embouchure de la rivière du Salagou vers le centre du lac (Fig. 1). Les échantillons

ont été prélevés à quelques centaines de mètres d'intervalle et à différentes profondeurs à l'aide d'un carottier à gravitation Kajak-Brinkhurst (KB). Deux tubes de 50 cm de longueur et de 6.5 et 7 cm de diamètre ont été utilisés. Les tubes sont descendus à environ 1 m du fond, puis lâchés perpendiculairement au fond du lac afin de pénétrer verticalement dans le sédiment par gravité. Le carottier est remonté et, par un phénomène de succion, le sédiment reste à l'intérieur du tube. Une fois remontée, la carotte de sédiment (KB) est bouchée juste avant sa sortie complète de l'eau afin de ne pas perdre le contenu du tube. Les 8 carottes sédimentaires ainsi prélevées ont ensuite été découpées tous les centimètres, puis stockées dans des sacs de plastique hermétiques pour être ensuite analysés en laboratoire.

3- Analyses en laboratoire

Analyse des micro-charbons

Le protocole d'analyse des charbons est basé sur celui d'Aleman et al. (2013). Les échantillons ont été préparés afin d'enlever l'ensemble de la matière organique et de ne préserver que le charbon. A l'aide d'un doseur plastique, qui facilite les prélèvements du sédiment liquide, 1.5 cm³ de matière a été prélevé sur les portions de 0 à 1 cm jusqu'aux portions de 3 à 4 cm. A l'aide d'un emporte-pièce, approprié aux prélèvements de sédiments compacts, 1cm³ de matière a été prélevé dans les échantillons de profondeurs plus importantes.

Dans chacun des échantillons préparés, 20 ml de javel diluée et 2 g de sodium métaphosphate sont ajoutés afin d'éliminer la matière organique et de défloculer le sédiment du complexe organo-humique. Ces échantillons sont ensuite placés sur l'agitateur pendant une semaine afin de permettre une bonne défloculation du sédiment. Les échantillons prêts sont passés au tamis de maille 160 µm. Seulement les fines particules et les micro-charbons persistent. Les micro-charbons sont alors triés et analysés à l'aide du logiciel WinSEEDLE. Pour chaque échantillon, les micro-charbons sont photographiés grâce à une loupe binoculaire

Olympus SZX9 (grossissement x 12.5) équipée d'un appareil photo relié à un ordinateur. L'analyse des photos avec le

logiciel WinSEEDLE a permis d'obtenir le nombre et la surface des charbons présents dans chaque échantillon.

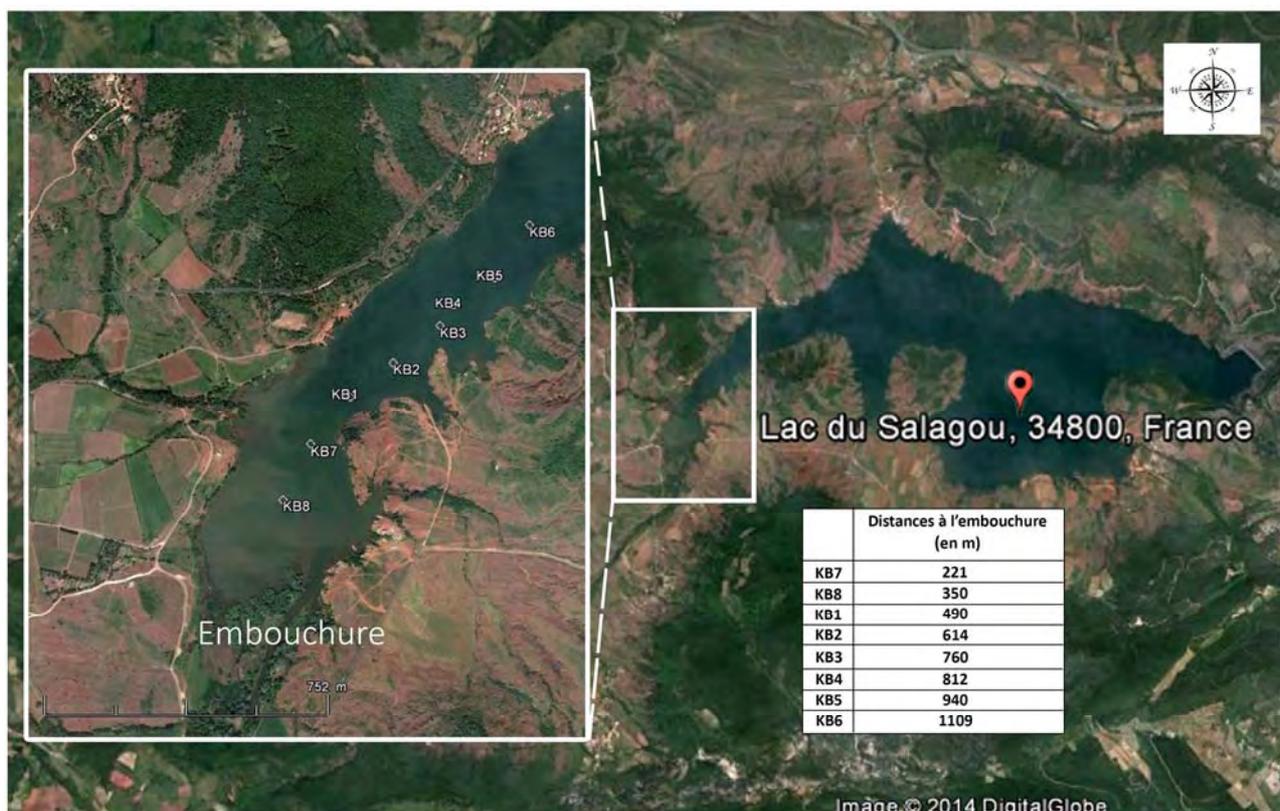


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage et distances à l'embouchure

Analyse des diatomées

Tous les échantillons de surface ont été analysés suivant un protocole d'extraction basé sur celui de [Battarbee et al. \(2001\)](#). 3 cm³ de sédiment ont été prélevés, sauf pour le KB8 parce qu'il ne restait plus assez de matière à la suite des différentes expériences effectuées pour les charbons et l'étude de la granulométrie ([Detrey et al., 2014](#)). Par la suite, ces prélèvements ont été déposés dans des cuvettes de papier aluminium préalablement pesées. Une fois la matière déposée, les cuvettes sont pesées à nouveau. Elles sont ensuite séchées à l'étuve à 50°C pendant toute une nuit et pesées une dernière fois afin de connaître le volume de matière sèche.

Le sédiment sec de chaque cuvette a été transvasé dans des béchers avec de l'eau distillée (100 ml maximum), préalablement

chauffée au four micro-ondes. Dans ces béchers, 50 ml de peroxyde d'oxygène (H₂O₂) ont été ajoutés. Ces béchers ont ensuite été disposés sur un bain de sable chaud à environ 50-60°C pendant environ 3 h, voire plus si nécessaire. A froid, les béchers sont remplis avec de l'eau distillée afin de diluer le peroxyde d'oxygène, puis le tout est laissé à décanter durant une nuit. Après la décantation, le surnageant est aspiré avec une pompe à vide. En évitant les remous afin de ne pas remettre le sédiment en suspension, environ 1 cm de liquide est laissé au fond. Ensuite, sur bain de sable entre 50 et 60°C, 20 ml d'hexamétaphosphate chaud (50g/l) et 100 ml d'eau chaude ont été ajoutés et ont agi pendant une demi-heure sur les échantillons. Les échantillons sont rincés, puis, après 2-3h, siphonnés et complétés avec de l'eau.

La dernière étape a consisté à monter les échantillons préparés sur lame. Pour cela, du

NAPHRAX a été utilisé. Du papier d'aluminium est mis sur une plaque chauffante à environ 200°C. Une fois les échantillons remués, une pipette par échantillon a été utilisée afin d'en prélever 350 µl. Ces prélèvements sont déposés sur des lames propres puis laissés à l'air libre pour le séchage. Ces lames ont ensuite été disposées sur le papier d'aluminium sur la plaque chauffante sous hotte. Sur chacune des lames ainsi chauffées, une fine couche de NAPHRAX est déposée jusqu'à l'apparition de bulles. Lorsque les bulles apparaissent, des lamelles sont ajoutées sur les lames hors de la plaque chauffante. Grâce à une pression sur la lamelle, les bulles d'air sont évacuées. Les lames sont ensuite numérotées avant d'être observées au microscope optique.

Afin d'analyser ces lames, 3 lignes aux graduations 100, 105 et 110 de la platine mobile d'un microscope optique Leica DM1000 (grossissement x 630) sont balayées. Sur ces 3 lignes, l'ensemble des diatomées sont comptées et déterminées jusqu'au genre à l'aide des clés de détermination de [Bourrelly \(1981\)](#) et de [Prygiel & Coste \(2000\)](#).

Perte au feu

La perte au feu permet de quantifier la matière organique d'un échantillon du sol par incinération. Les analyses ont été effectuées par [Detrey et al. \(2014\)](#) et utilisées pour normaliser les quantités de charbons en fonction de la compaction des sédiments.

Analyses statistiques

Un diagramme de l'abondance des micro-charbons a été réalisé à l'aide du logiciel Excel. Il permet de présenter la quantité de charbons dans chacun des KB en fonction de la profondeur.

Pour les diatomées, les courbes de raréfaction des taxons comptés ont été calculées et tracées avec le logiciel R (package Vegan). Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel R (package FactoMineR) pour interpréter les assemblages

obtenus. Cette méthode a un intérêt particulier, car toutes les variables (descriptives et environnementales) sont prises en compte et une représentation graphique permet d'observer leur poids dans la distribution des diatomées comptées dans les différents KB.

RESULTATS

1- Étude des micro-charbons

Modèle de compaction sédimentologique basé sur les résultats de perte au feu

La masse de matière sèche en fonction de la profondeur pour les KB3, KB6 et KB8 est utilisée pour établir un modèle de compaction des sédiments pour l'ensemble des KB ([Annexe 1](#)). Nous constatons qu'en fonction de la profondeur, la masse diminue. Globalement, plus l'échantillon est localisé en profondeur dans le sédiment, moins il contient d'eau, plus sa densité augmente, et moins la différence de masse entre sédiment sec et humide est importante. Les coefficients de corrélation des régressions linéaires sont relativement corrects avec des R^2 entre 0,71 et 0,94. Il existe donc une certaine compaction en fonction de la profondeur. Cependant, comme la compaction est assez faible (pente faible), nous avons choisi de ne pas appliquer de normalisation systématique sur les influx de charbons.

Distribution des charbons sédimentaires en fonction de la distance à l'embouchure

La distribution des charbons en fonction de la profondeur du sédiment ([Fig. 2](#)) permet d'observer une quantité de charbons plus importante près de l'embouchure. On observe un maximum de 55 charbons dans le KB8 (le plus proche de l'embouchure), alors qu'on observe seulement 1 charbon dans le KB6 (le plus éloigné). La moyenne des charbons retrouvés dans les KB est de 21,5. Cette tendance s'observe particulièrement entre les deux KB les plus proches (7 et 8) de l'embouchure et ceux plus éloignés (5 et 6).

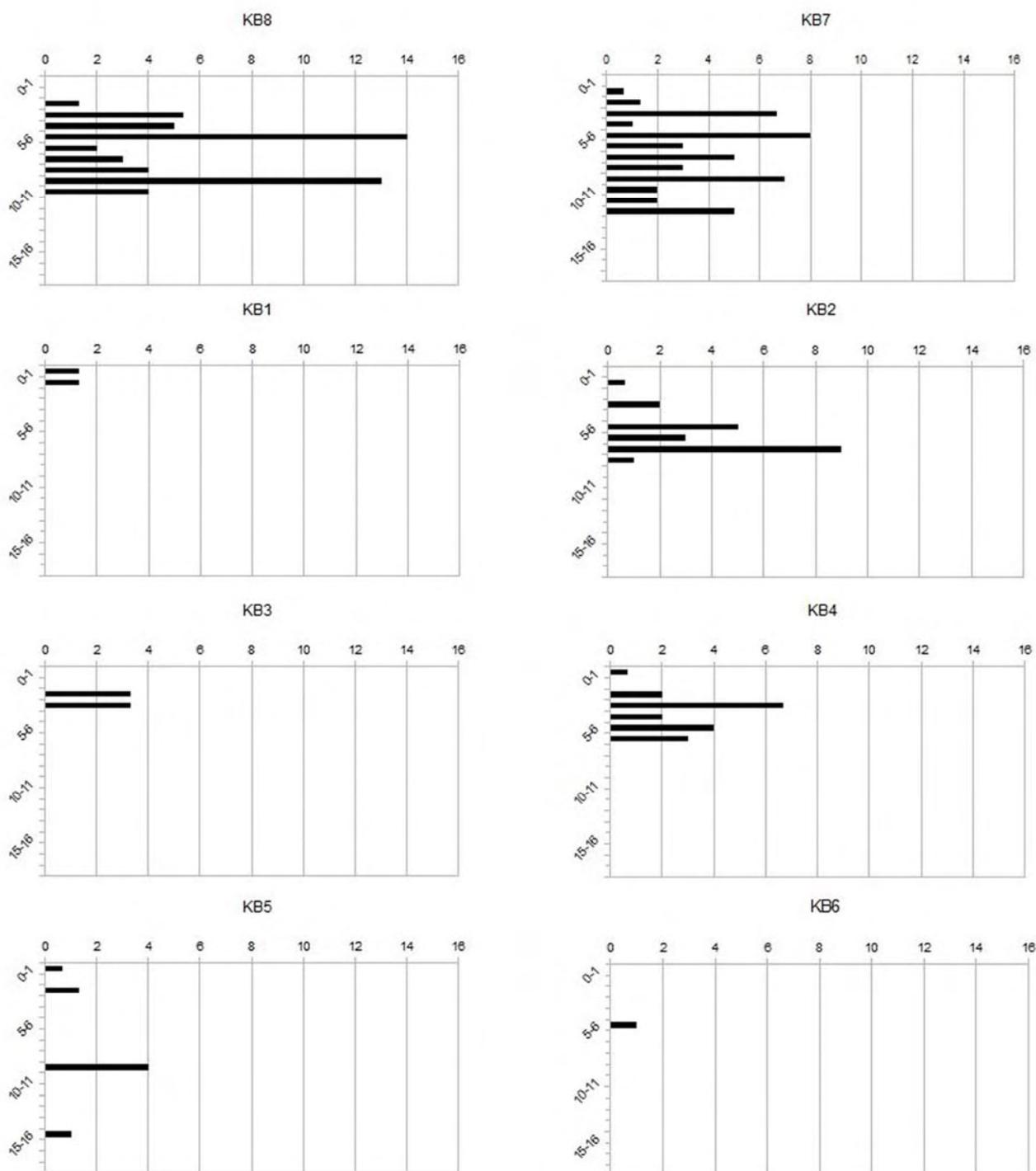


Figure 2. Nombre de charbons en fonction de la profondeur dans les sédiments de subsurface étudiés, prélevés à l'aide d'un carottier Kajak-Brinkhurst (KB). Les KB sont présentés en fonction de leur distance à l'embouchure de la rivière Salagou.

2- Étude des assemblages de diatomées

Diagramme des assemblages

Le diagramme d'abondance des diatomées (Fig. 3) présente les assemblages pour chaque partie superficielle de chaque KB échantillon-

né. Sur cette figure, les KB sont classés en fonction de la distance à l'embouchure du lac. 22 genres de diatomées ont été identifiés, avec des différences d'abondances importantes (de 0 à 50,9 %). Les assemblages de diatomées diffèrent fortement selon les KB. En effet, les KB1, 2 et 7, les plus proches de l'embouchure

(Fig. 1), présentent un assemblage caractérisé principalement par une forte présence en *Fragilaria* qui domine les autres genres. Malgré un nombre toujours important de

Fragilaria dans les KB éloignés de l'embouchure (3, 4, 5 et 6), une forte présence d'*Aulacoseira* est observée, ainsi qu'une diminution du nombre d'*Achnanthes*.

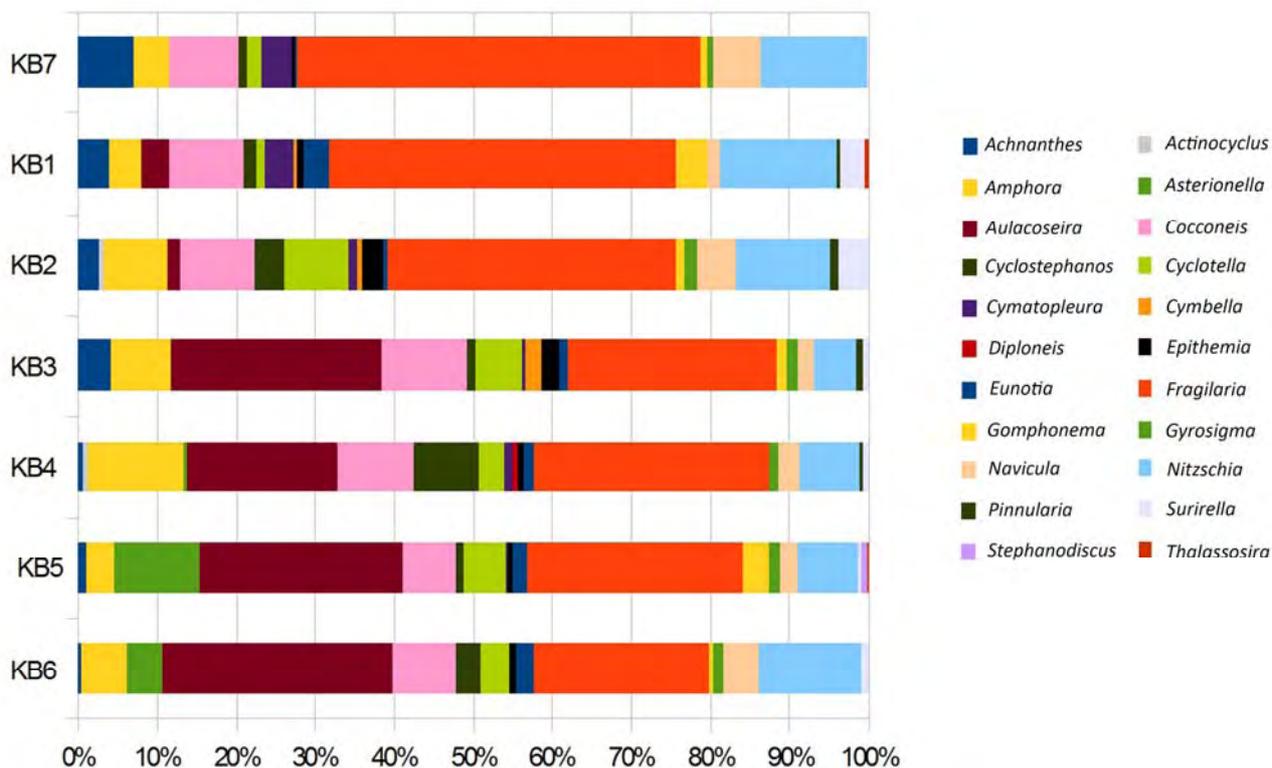


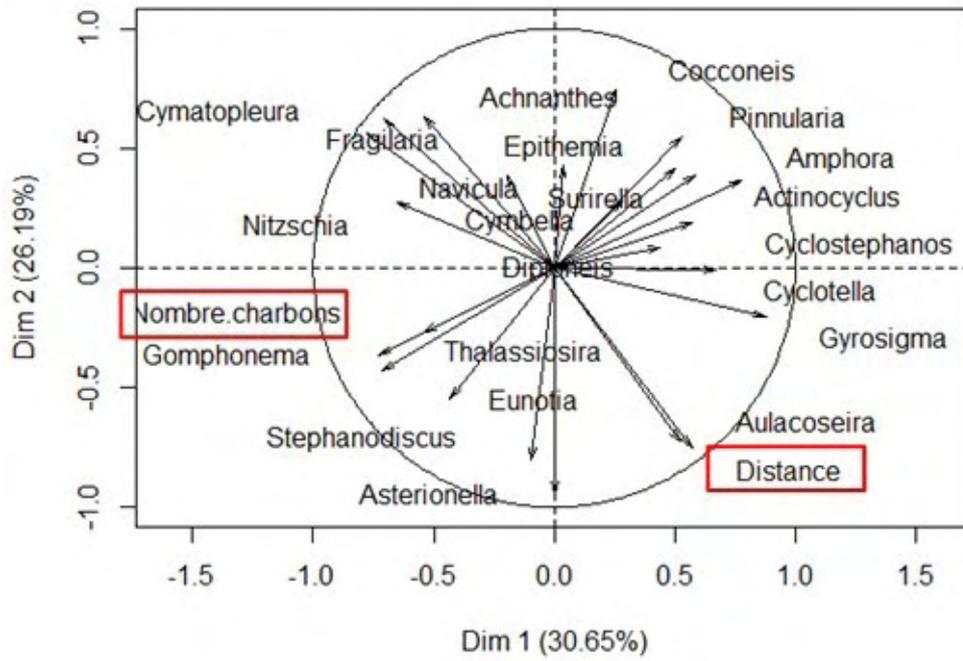
Figure 3. Variation de l'abondance relative moyenne (%) des principaux genres de diatomées, à une profondeur de 0-1 cm de sédiments, dans les 7 KB étudiés

Afin de tester la validité statistique des comptages, nous avons établis des courbes de raréfaction qui représentent l'effort de comptage effectué lors de l'analyse des diatomées, d'après le nombre d'individus comptés par échantillon en fonction du nombre de taxons. Les courbes s'interprètent de la manière suivante : si l'allure de la courbe se rapproche d'une asymptote, c'est-à-dire si le nombre de taxons n'augmente plus que très peu malgré l'augmentation du nombre d'individus comptés, alors l'effort de comptage a été suffisant et des analyses statistiques peuvent être envisagées (Annexe 2). L'effort de comptage n'a pas été suffisant pour les échantillons : KB8 5-6 cm, KB4 0-1 cm et KB3 6-7 cm.

Répartition des diatomées d'après une Analyse en Composantes Principales

Pour mieux comprendre la distribution des diatomées entre les échantillons et l'influence des paramètres environnementaux sur cette répartition, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP ; Fig. 4), uniquement sur les échantillons où l'effort de comptage était suffisant et ceux les plus proches de l'interface, pour que les données soient comparables temporellement. Cette analyse permet une représentation en deux dimensions du nuage des points de prélèvement associés à l'influence des variables environnementales relevées (ici, la distance à l'embouchure). Elle intègre également le nombre de charbons, afin de savoir si nos résultats pour les charbons et pour les diatomées sont corrélés.

A. Cercle des corrélations, distribution des taxons



B. Distribution des échantillons

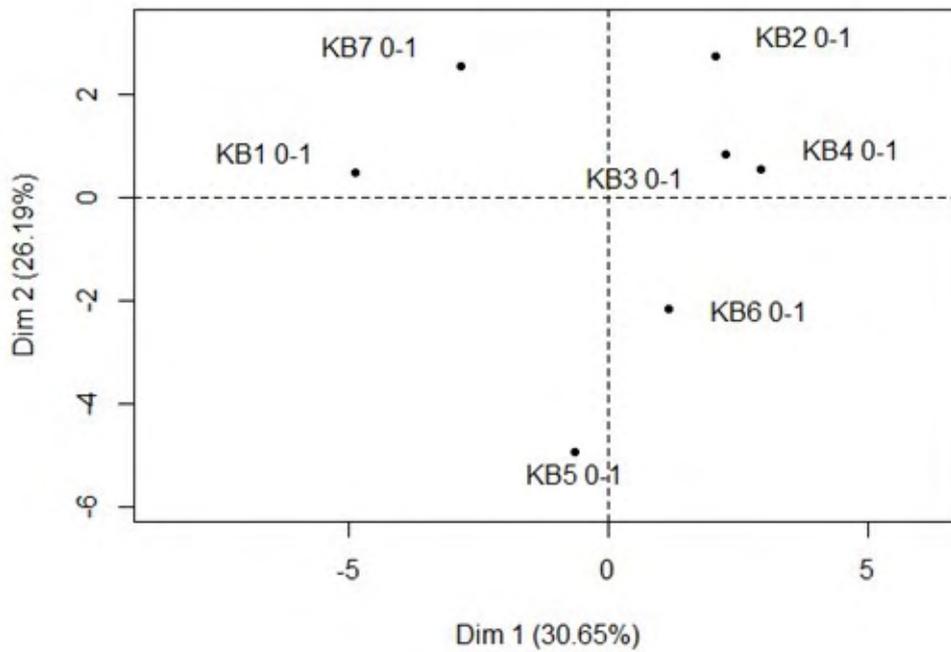


Figure 4. Analyse en composantes principales :
 (A) Répartition des taxons où les composantes explicatives sont encadrées en rouge ;
 (B) Répartition des échantillons

L'ACP montre que la variable « nombre total de charbons » se situe sur l'axe 1 et « la distance à l'embouchure » sur l'axe 2. Ce sont les genres *Cymatopleura*, *Nitzschia*, *Gomphonema* et *Stephanodiscus* qui influencent négativement l'axe 1, et les genres *Gyrosigma*, *Aulacoseira*, *Cocconeis*, *Pinnularia* et *Actinocyclus* positivement. L'axe 2 est expliqué préférentiellement par les genres *Aulacoseira* et *Asterionella*, qui influencent positivement l'axe, contrairement à *Fragilaria*, *Cymatopleura*, *Cocconeis* et *Actinocyclus*.

DISCUSSION

La distribution des charbons sédimentaires (Fig. 1) permet d'évaluer l'impact des feux sur la dynamique paléocéologique du milieu (Ali et al., 2009). Cependant, chaque milieu de dépôt a son fonctionnement propre et il est important de bien comprendre la source des charbons pour interpréter les analyses. La Figure 1 indique une plus forte abondance de charbons lorsqu'on se situe près de l'embouchure de la rivière Salagou. On peut donc supposer que les charbons sont préférentiellement transportés par la rivière et non par les vents. Il est probable que l'écobuage des bords de la ripisylve soit à l'origine des charbons. Il est aussi envisageable que les aires de barbecue le long des berges alimentent le lac en charbons. Il aurait été intéressant d'analyser la morphologie des charbons afin de différencier le type de biomasse brûlée (herbacée/arborée), comme ce qui a été fait par Aleman et al. (2013) pour différencier les brûlis d'écobuage (a priori surtout herbacés) des feux de barbecue (charbons de bois). En effet, ces auteurs montrent que l'analyse du ratio largeur/longueur des charbons permet de différencier la biomasse brûlée herbacée (charbons allongés) de la biomasse ligneuse (charbons plus carrés).

Les assemblages de diatomées présentent de grandes différences visuelles entre les échantillons (Fig. 2), ce qui est aussi révélé par l'ACP. La distance à l'embouchure semble influencer la composition en diatomées sur chacune des stations de

prélèvement. Cela peut être expliqué par le fait que les diatomées sont sensibles aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau, telles que la température, le pH, la turbidité et la profondeur (Levkov et al., 2013). Il est cependant probable que l'utilisation des diatomées comme indicatrices de la qualité des eaux (Prygiel & Coste, 2000) soit fortement limitée par la faible résolution taxonomique (au genre). Enfin, ce genre d'analyse statistique nécessite que l'effort de comptage ait été suffisant sur l'ensemble des données, ce qui est pratiquement le cas dans cette étude préliminaire.

En dépit de ces limites, quelques remarques sont possibles. Le genre *Achnanthes* comprend des espèces monoraphidées épiphytes, principalement fixées aux formes dures et pour la plupart indicatrices d'eaux de bonne qualité et bien oxygénées. La présence de ces diatomées près de l'embouchure y suggère donc la présence d'eaux oxygénées, en lien avec un courant plus important. *Fragilaria* et *Aulacoseira* sont deux genres de diatomées coloniales, qui forment de longues chaînettes d'individus assemblés par des structures en silice. L'association de plusieurs individus permet de limiter la sédimentation dans des eaux calmes. Comme ces deux genres utilisent la même stratégie, les différences de localisation observées ne peuvent pas être expliquées par leur morphologie. *Fragilaria* est un genre de diatomées araphidées, inféodées aux milieux neutrophiles oligo-mésotrophes, pauvres en élément nutritifs, tandis qu'*Aulacoseira* est une diatomée centrophycidée caractéristique des milieux calmes et eutrophes. On peut donc en déduire que les éléments nutritifs plus abondants dans les zones plus calmes, éloignées de l'embouchure, favorisent le développement d'*Aulacoseira* (Levkov et al., 2013).

La Figure 4 montre que les genres de diatomées *Aulacoseira* et *Gyrosigma* influencent positivement l'axe 1 et en même temps, le « nombre de charbons » vient lui aussi se placer sur cet axe de l'ACP. Le lien entre ces genres et le nombre de charbons est difficile à interpréter et peut être fortuit. Il est envisageable que la présence de charbons de

bois en grandes quantités influence la composition de l'eau dans les milieux peu profonds, et que certains genres de diatomées soient favorisés. Ceci pourrait être vérifié en augmentant le nombre de prélèvements dans des milieux différents, et en tenant compte de paramètres environnementaux tels que le pH et les nutriments qui influencent très fortement les colonies algaires (Levkov et al., 2013).

CONCLUSION

L'étude réalisée a permis de comprendre les modes de dépôt des charbons et les assemblages des genres de diatomées présents dans les eaux du lac du Salagou. L'analyse des micro-charbons a confirmé qu'il n'y avait pas eu d'incendie depuis la mise en eau du lac. La distribution spatiale et la morphologie allongée (biomasse herbacée brûlée) des charbons indiquent que leur source principale serait l'écobuage.

Pour ce qui est de l'étude des diatomées il aurait été intéressant d'affiner la détermination jusqu'à l'espèce. En effet, il existe une grande disparité d'écologies au sein d'un même genre. Certaines espèces sont caractéristiques de milieux spécifiques, et leur abondance est un moyen efficace de caractériser le milieu dans lequel elles vivent et donc les perturbations qu'il a pu subir.

REFERENCES

Aleman J.C., Blarquez O., Bentaleb I., Bonté P., Brossier B., Carcaillet C., Gond V., Gourlet-Fleury S., Kpolita A., Lefèvre I., Oslisly R., Power M., Yongo O., Bremond L. & Favier C. (2013). Tracking land-cover changes with sedimentary charcoal in the Afrotropics. *The Holocene*, 23, 1853-1862.

Ali A.A., Higuera P.E., Bergeron Y. & Carcaillet C. (2009). Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research*, 72 : 462-468.

Allée P. & Lespez L. (2006). *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*. Presses de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 480 p.

Battarbee R.W., Jones V.J., Flower R.J., Cameron N.G., Bennion H., Carvalho L. & Juggins S. (2001). Diatoms In: J.P. Smol, H.J.B. Birks & M.L. William (eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 3: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 155-202.

Bourrelly P. (1981). *Les Algues d'eau douce : Initiation à la systématique. Tome II : Les algues jaunes et brunes, Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées*. Collection "Faune et Flore actuelles", Société Nouvelle des éditions Boubée, Paris.

Dayde J., Detrey J. & Fort G. (2014). Etude sédimentologique du lac Salagou : 50 ans d'histoire d'un lac d'origine anthropique. *Orpal Synthesis*, 7 : 19-26.

Dumont J.F. (2013). Octon et Salsac, *MAS des Terres Rouges*.

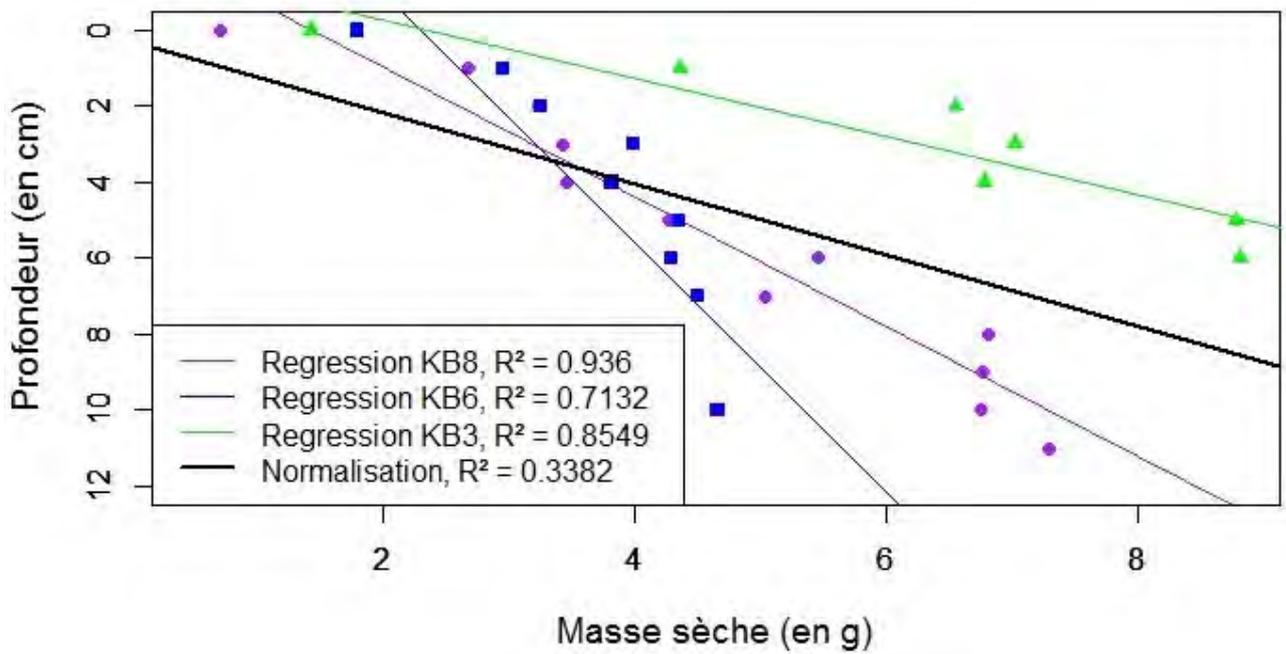
Levkov Z., Metzeltin D., Pavlov A. & Lange-Bertalot H. (2013) *Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 7: Luticola and Luticolopsis*. Koeltz Scientific Books, Koenigstein.

Nguestsop V.F., Servant-Vildary S. & Roux M. (2010). Long and short-time scale climatic variability in the last 5500 years in Africa according to modern and fossil diatoms from Lake Ossa (Western Cameroon). *Global and Planetary Change*, 72 : 356-367.

Prygiel J. & Coste M., coord. (2000). *Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Biologique Diatomées, Tome II : Clés de détermination des espèces intervenant dans le calcul de l'Indice Biologique Diatomées*. Agence de l'Eau Artois-Picardie et Cemagref, Bordeaux, 340 p.

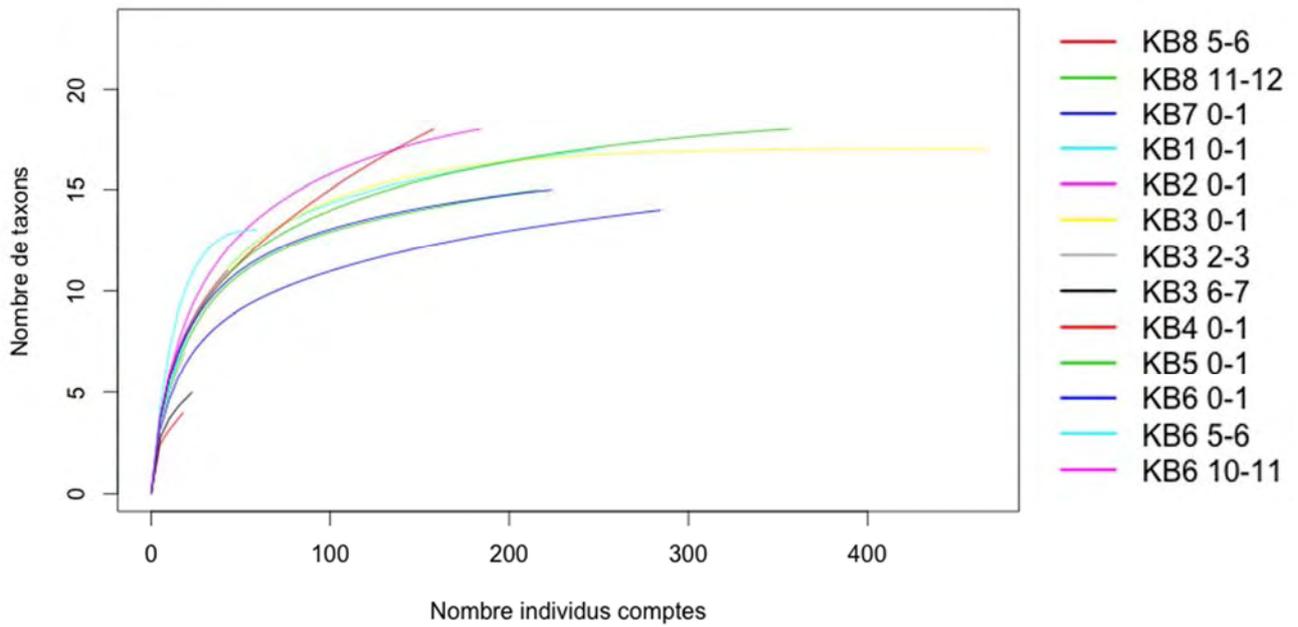
ANNEXE 1.

Masse de matière sèche (en g) en fonction de la profondeur (en cm) pour les 3 KB étudiés et droites de régression pour chaque série. La droite noire nommée « Normalisation » représente la régression faite sur l'ensemble des points de 3 KB.



ANNEXE 2

Courbes de raréfactions des taxons de diatomées comptés dans chaque KB.



ENREGISTREMENTS POLLINIQUES ACTUELS D'UN BASSIN VERSANT AU SEIN DU LAC DU SALAGOU

Antoine Gazaix ¹, Océane Liehrmann ², Marie-Paule Savelli ³

Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier
Université Montpellier-2, 34095 Montpellier cedex 05

¹ antoine.gazaix@gmail.com, ² oceane.liehrmann@gmail.com, ³ mariepaula.savelli@gmail.com

Encadrement : Serge Muller

Citation : Gazaix A., Liehrmann O. & Savelli M.-P. (2014). Enregistrements polliniques actuels d'un bassin versant au sein du lac du Salagou. *Orpal Synthesis*, 7 : 39-52.

Résumé : Une étude des pollens présents dans les sédiments du lac du Salagou (Hérault, France) a été effectuée, selon un transect perpendiculaire à l'embouchure d'une rivière. Des échantillons ont été récoltés par carottage et la végétation du bassin versant a été cartographiée, sur la base de relevés phytosociologiques. L'enregistrement pollinique des différents habitats naturels du bassin versant a montré une influence de l'apport fluvial, qui entraîne la surreprésentation des taxons de la ripisylve. Un apport lointain est révélé par la présence de pollen de hêtre (*Fagus sylvatica*), absent du bassin versant.

Mots clés : palynologie, végétation, référentiel, phytosociologie, Hérault

Abstract: *Modern pollen records of a watershed in Salagou Lake.* A study of the pollen which are present in the sediments of the lake of Salagou had been done (Hérault, France), according to a transect of distance of the mouth of a river. Samples had been taken by core drilling and the vegetation of the catchment area had been mapped. So, the recording of the different habitats in the sediments showed originalities, in particular an influence of the contribution of the river. Also, the presence of beech's pollen (*Fagus sylvatica*) highlights the contribution of far habitats in the recordings.

Key words: palynology, vegetation, reference study, phytosociology, Hérault

L'étude des paléoenvironnements consiste à reconstituer les changements passés des paysages, et à en identifier les déterminismes (activités anthropiques, facteurs naturels). Cela permet notamment de comprendre les modifications et évolutions des environnements actuels, et d'en prévoir les transformations à venir (Bottema, 1982).

La reconstitution des paléoenvironnements peut être réalisée grâce à la palynologie, qui étudie les grains de pollen conservés dans les couches sédimentaires. Il est ainsi possible de

reconstituer l'histoire des formations végétales et de la flore présentes dans le passé. La méthode analytique est basée sur le principe d'actualisme, qui consiste à utiliser la connaissance du présent pour interpréter les données fossiles, en supposant que les taxons polliniques retrouvés possédaient les mêmes caractéristiques écologiques qu'actuellement. Le piégeage et la conservation des grains de pollen dépendent de différents paramètres (mode de transport, milieu de piégeage), et ne sont pas toujours uniformes, dans le temps comme dans l'espace (Davis et al., 1984). Les caractéristiques diffèrent d'un environnement

à l'autre, ce qui rend difficile la transposition des résultats d'une étude réalisée sur un site donné, à d'autres.

La présente étude s'intéresse aux grains de pollen conservés dans des sédiments de surface du lac du Salagou. Elle a pour but de comparer la végétation présente sur le bassin versant du lac du Salagou avec le contenu pollinique des sédiments du lac, et d'évaluer l'influence du mode de transport (par le vent et par la rivière) sur l'enregistrement. Nous nous proposons pour ce dernier point de tester les hypothèses suivantes : (1) le transport fluvial a un effet différentiel sur la végétation mésophile et sur la végétation riveraine, et (2) cet effet est plus visible près de l'embouchure de la rivière que loin. Le prélèvement des carottes de sédiments de surface a dans ce but été réalisé sur un transect perpendiculaire à l'embouchure d'une rivière qui alimente le lac du Salagou.

MATERIEL ET METHODES

1- Zone d'étude

Situé à une cinquantaine de kilomètres de Montpellier, près de Clermont l'Hérault, le lac du Salagou a été inauguré en 1969 par le Conseil Général afin de créer un réservoir d'eau pour l'irrigation des cultures alentours. Ce lac tire son nom du ruisseau qui a servi à sa mise en eau, et qui draine le bassin versant sur lequel cette étude se limite. Sa longueur avoisine les 7 km, avec une superficie de 750 hectares et une profondeur d'environ 40 m. Il contient 125 millions de m³ d'eau. L'emplacement du lac a été choisi en raison de la nature du substratum : la ruffe, un combiné de sédiments argileux et d'oxydes de fer datant du Permien, qui a pour particularité d'être relativement imperméable (Guiraud & Martin, 2007).

2- Travail de terrain

La première étape a été de réaliser la cartographie de la végétation du bassin versant du Salagou. Les différentes routes du secteur ont été parcourues du 22 au 24 janvier 2014 afin d'avoir une vue d'ensemble de la

végétation et de la cartographier sur la carte IGN au 1/25000 du site. Des relevés de végétation, référencés par GPS, ont été systématiquement réalisés dans les différents milieux rencontrés (ripisylves, matorrals, forêts, milieux ouverts...). Les relevés ont été faits selon la méthode de Braun-Blanquet (1932), sur des quadrats de surface comprise entre 200 et 400 m². Pour chacun d'eux, nous avons rempli une fiche terrain comprenant des informations sur la pente, la surface, le recouvrement de l'ensemble de la végétation et la part de la strate arbustive dans ce dernier, ainsi que l'inventaire et le recouvrement au sol des différentes espèces. Le recouvrement a été estimé selon les classes de la phytosociologie : +, quelques individus ; 1, 0-5 % ; 2, 5-25 % ; 3, 25-50 % ; 4, 50-75 % ; 5, 75-100 %. L'ensemble de ces données a permis de caractériser les différentes formations végétales du bassin versant, bien souvent distinguées par une espèce dominante. Sur le terrain, un fond de carte a été complété au fur et à mesure. Chaque grand ensemble de la végétation était représenté sur la carte en prenant pour repères les ruisseaux, lignes de crêtes ou bâtiments par exemple, afin de tracer le plus précisément possible les limites de chaque milieu.

Afin d'étudier les pollens déposés dans le lac du Salagou, 8 échantillonnages ont été pratiqués dans le sédiment selon un transect partant de l'embouchure de la rivière Salagou, et en s'éloignant de cette dernière (Annexe 1). Les échantillons utilisés ont été récupérés à l'aide d'un carottier Kajak-Brinkhurst, basé sur le principe de gravité. Le prélèvement des carottes sédimentaires et leur découpe centimètre par centimètre ont été réalisés par une autre équipe (Mato et al., 2014).

3- Travail de laboratoire

La carte obtenue a été scannée, géo-référencée, puis informatisée en réalisant des polygones pour chaque habitat. Les surfaces de ces derniers ont été mesurées, ainsi que les distances moyennes entre l'habitat et l'embouchure du Salagou. Pour la réalisation de la cartographie, nous avons utilisé le logiciel libre QGIS (QGIS Développeur

Team, 2013), avec l'aide de Laure Paradis (CBAE).

L'observation des pollens dans les sédiments a nécessité une préparation chimique afin d'éliminer au maximum les minéraux et les débris organiques. La sporopollénine, molécule constitutive du pollen, permet l'utilisation de nombreux traitements, car elle est une des substances naturelles les plus résistantes (Denis et al., 2013). Le protocole utilisé (Berglund & Jasiewiczowa, 1986 ; Annexe 2) permet d'éliminer étape par étape les différents éléments susceptibles d'être trouvés dans les sédiments.

Les échantillons traités ont été montés entre lame et lamelle pour l'observation microscopique. Les résidus sont dilués avec de la glycérine, puis 0,025 ml du culot obtenu sont déposés entre lame et lamelle. De l'histolaque est ensuite déposée sur les bordures de la lamelle pour la fixer hermétiquement à la lame (photos des lames en Annexe 3). Les échantillons récupérés étant en partie liquides, nous n'avons pas pu mesurer le volume de sédiment prélevé : la concentration en pollen des différents sédiments n'a donc pu être évaluée.

Afin d'éviter un possible biais lié à l'intervention de plusieurs analystes, chaque lame a été comptée par chacun d'entre nous. Nous avons compté chacun un minimum de 100 grains de pollen par lames. Le comptage s'effectue sur des lignes parallèles en identifiant tous les grains de pollen rencontrés. Des tests de student ont été réalisés avec le logiciel PAST (Hammer et al., 2001) pour vérifier si les comptages des analystes étaient homogènes. L'identification a été limitée à 36 taxons, les autres étant comptés en indéterminés. Suite aux comptages, les différents nombres de grains de pollen dénombrés par chacun de nous sont additionnés par échantillon. Les résultats ont été mis sous forme de tableur, et des diagrammes polliniques ont été réalisés avec le logiciel Polpal (Nalepka & Walanus, 2003).

4- Analyses numériques

Dans le but de comparer l'enregistrement pollinique d'un habitat avec sa répartition dans le bassin versant, nous avons calculé, d'une part un indice pondérant la surface de sa répartition par la distance moyenne au lac (indice de répartition = surface / distance moyenne au lac), et d'autre part un pourcentage pollinique moyen pour l'ensemble des KB. Pour les habitats morcelés, nous avons fait la somme des indices de chaque polygone. Afin de faciliter la représentation graphique, un indice de référence a été défini de manière à pouvoir comparer pour chaque taxon l'indice et le pourcentage pollinique. Nous avons choisi *Quercus pubescens*, qui est correctement représenté dans le pollen (De Beaulieu, 1977) et dont l'apport pollinique est uniquement éolien. Les indices de chaque habitat sont ainsi divisés par 451 (indice de répartition de la chênaie caducifoliée / pourcentage pollinique de la chênaie caducifoliée = 451) produisant ainsi un rapport de base qui sera utilisé pour déterminer la représentativité des habitats. Pour la ripisylve, un indice peut être déterminé de façon purement théorique, car cet habitat est considéré comme linéaire et ne figure pas sur les cartes. Différentes hypothèses issues de mesures ont été faites (largeur de 10 à 20 mètres, longueur du réseau occupé par la ripisylve entre 20 et 30 km, et distance moyenne à l'embouchure de 2,5 à 3,5 km) afin de calculer différents indices.

Le logiciel PAST (Hammer et al., 2001) a été utilisé pour calculer les indices de Shannon (Shannon & Weaver, 1949) et l'équitabilité (Smith & Wilson, 1996) entre les différents points d'échantillonnages. Le logiciel PolPAL (Nalepka & Walanus, 2003) a permis la réalisation de diagrammes polliniques et le logiciel Statistica 6 (StatSoft Inc., 2001) a été utilisé pour calculer et tester (tests de Fisher) les corrélations entre la distance séparant les points à l'embouchure et les indices de diversité ou les pourcentages polliniques de certains taxons et habitats.

RESULTATS

1- Homogénéité des comptages

Les comptages étant réalisés par 3 analystes débutants : nous nous attendions à ce qu'il y ait des différences d'identification entre chacun de nous. Les problèmes que cela aurait pu engendrer ont été évités en intervenant tous sur chaque lame. Toutefois, nous avons testé l'homogénéité des richesses polliniques obtenues entre les 3 analystes afin de vérifier si notre précaution était vraiment nécessaire. Le test d'égalité de l'espérance de deux variables (Student) montre une différence significative pour un des analystes ($p < 0.01$; $p > 0.9$ entre les deux autres).

2- Cartographie des milieux du bassin versant

La cartographie des habitats du bassin versant étudié est présentée **Figure 1**. Parmi les 10 habitats identifiés, un seul (la ripisylve) n'est pas représenté sur la carte, car linéaire et uniquement présent le long des cours d'eau. 7 de ces habitats (Cédraie, Châtaigneraie, Chênaie caducifoliée, Chênaie sclérophylle, Lande à buis, Matorral à filaire, Pinède) sont dominés par une espèce principale, et deux sont définis par un assemblage d'espèces (Cultures et Pelouses) (**Tab. 1**). Ces habitats peuvent être regroupés en quatre catégories, définies d'après la physionomie des formations végétales : naturelles, herbacées, ligneuses et artificielles (cultures herbacées/arbustives, plantations d'arbres).

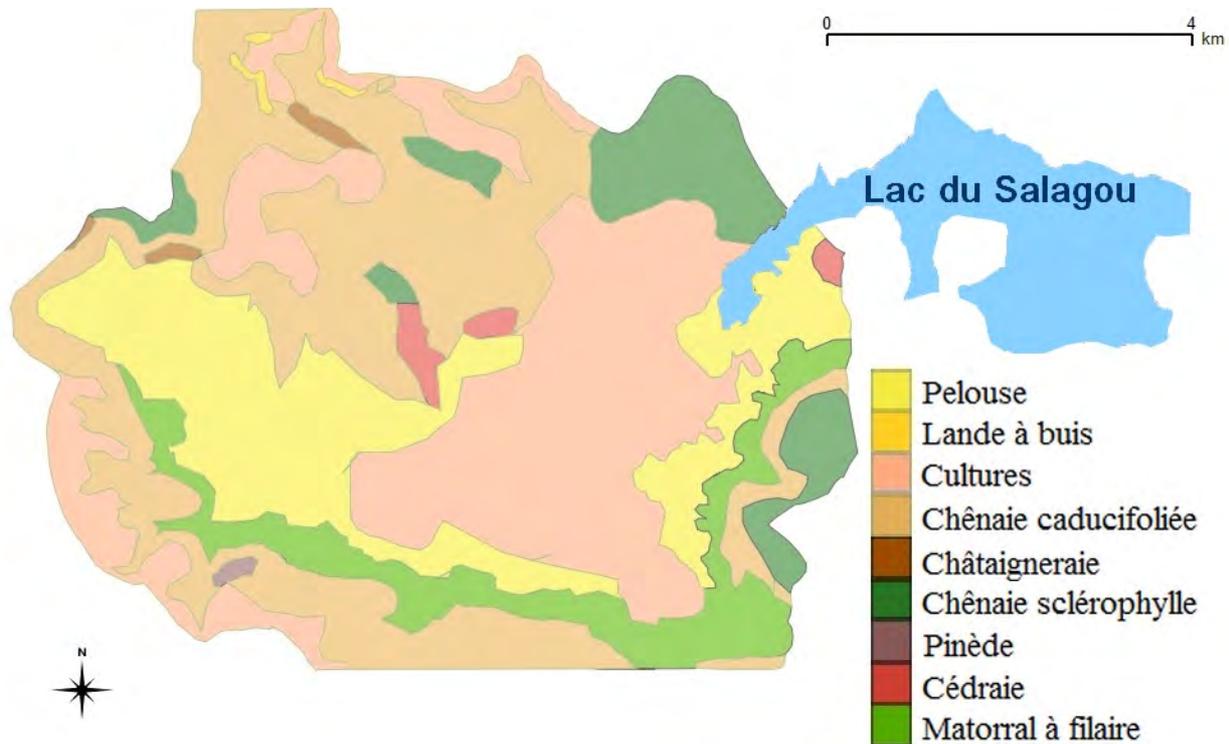


Figure 1. Cartographie de la végétation du bassin versant du Salagou

Les différents milieux ont une répartition particulière et non homogène, avec notamment plus de zones cultivées et de milieux ouverts relativement proches du lac. Les taxons forestiers se retrouvent généralement un peu plus loin du lac (à l'exception d'une petite zone à *Quercus ilex*, qui borde sur une faible longueur le lac), là où le relief commence à s'élever. En considérant

l'indice de répartition (**Tab. 1**), certains habitats peu représentés se retrouvent encore moins importants : par exemple, les zones à pins ou à châtaigniers. En revanche, certains milieux sont plus faiblement pondérés, puisque leur aire de répartition se situe plus proche du lac : c'est le cas des milieux ouverts (pelouses et cultivées).

Table 1. Caractéristiques et composition des différents habitats

Habitat	Taxons dominants	Surface (ha)	Indice de répartition	Pourcentages polliniques
Pelouse	Amaranthaceae, Asteraceae, Brassicaceae, <i>Genista</i> , Geraniaceae, <i>Plantago</i> , Poaceae, Urticaceae	1 016,60	5135	8
Lande à buis	<i>Buxus sempervirens</i>	71,2	125	1,4
Cultures	Céréales, <i>Olea</i> , <i>Vitis</i>	1 501,60	5792	1,3
Chênaie caducifoliée	<i>Quercus pubescens</i>	1 446,40	3655	8,1
Chênaie sclérophylle	<i>Quercus ilex</i>	424,8	2030	17,5
Matorral à filaire	<i>Phillyrea latifolia</i>	467,4	1367	10,1
Châtaigneraie	<i>Castanea sativa</i>	30	53	0,5
Pinède (plantation)	<i>Pinus</i>	9,4	15	19,5
Cédraie (plantation)	<i>Cedrus atlantica</i>	62,8	261	0,2
Ripisylve	<i>Alnus</i> , <i>Corylus</i> , Cyperaceae, <i>Fraxinus</i> , <i>Populus</i> , <i>Salix</i>	-	-	-

3- Données polliniques

Les données polliniques sont présentées sur un diagramme pollinique par taxon (Fig. 2), eux-mêmes regroupés par grands milieux (Fig. 3). La Figure 2 montre des différences importantes de représentation pollinique des différents taxons : certains sont très abondants (*Alnus*, *Phillyrea*, *Pinus*, *Quercus ilex*, *Quercus pubescens*), tandis que d'autres sont peu représentés (Amaranthaceae, *Betula*, Céréales, *Fraxinus*, *Olea*, Poaceae, *Salix*), voire ponctuels (*Fagus*, Geraniaceae, Urticaceae). Ensuite, pour la majorité des taxons, il ne semble pas y avoir de tendance particulière liée à la distance à l'embouchure du Salagou. Cependant, pour certains,

notamment pour *Corylus*, *Fraxinus*, *Populus* et *Salix*, il est possible d'observer une légère réduction de la part des pollens avec la distance à l'embouchure. Enfin, l'olivier (*Olea*) et les pollens indéterminés (abîmés) semblent être plus abondants en s'éloignant de l'embouchure. Quant à l'observation des milieux, aucune tendance ne semble ressortir. Toutefois, la ripisylve paraît être fortement influencée par la répartition d'*Alnus*, il peut donc être intéressant de l'étudier sans ce taxon. Les R^2 et p -values calculés pour les espèces présentant des tendances supposées sont présentés Table 2. Seul *Fraxinus* et le milieu de ripisylve sans *Alnus* présentent des p -values inférieures à 0,05.

Table 2. Corrélations entre pourcentage pollinique et distance à l'embouchure pour les taxons présentant des tendances sur les diagrammes. Test de Fisher : ns, non significatif ; *, significatif (p -value < 0.05)

	R	R^2	F	p-value
<i>Fraxinus</i>	0,752	0,565	7,800	*
<i>Populus</i>	0,685	0,469	5,299	ns
<i>Salix</i>	0,379	0,144	1,006	ns
<i>Corylus</i>	0,633	0,401	4,016	ns
<i>Alnus</i>	0,204	0,042	0,260	ns
Ripisylve	0,215	0,046	0,291	ns
Ripisylve sans <i>Alnus</i>	0,814	0,662	11,763	*
<i>Olea</i>	0,667	0,445	4,817	ns

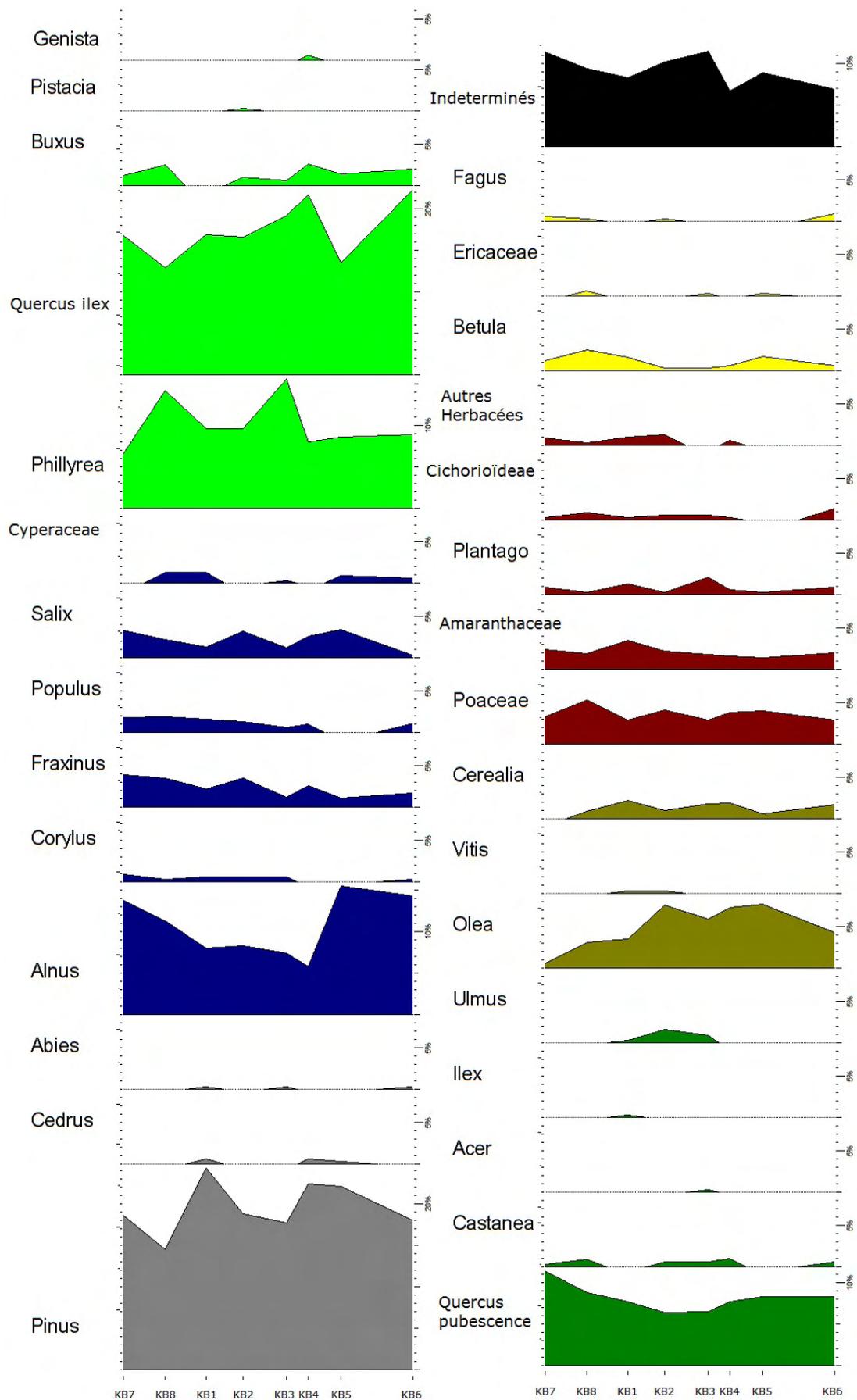


Figure 2. Diagramme pollinique par taxons

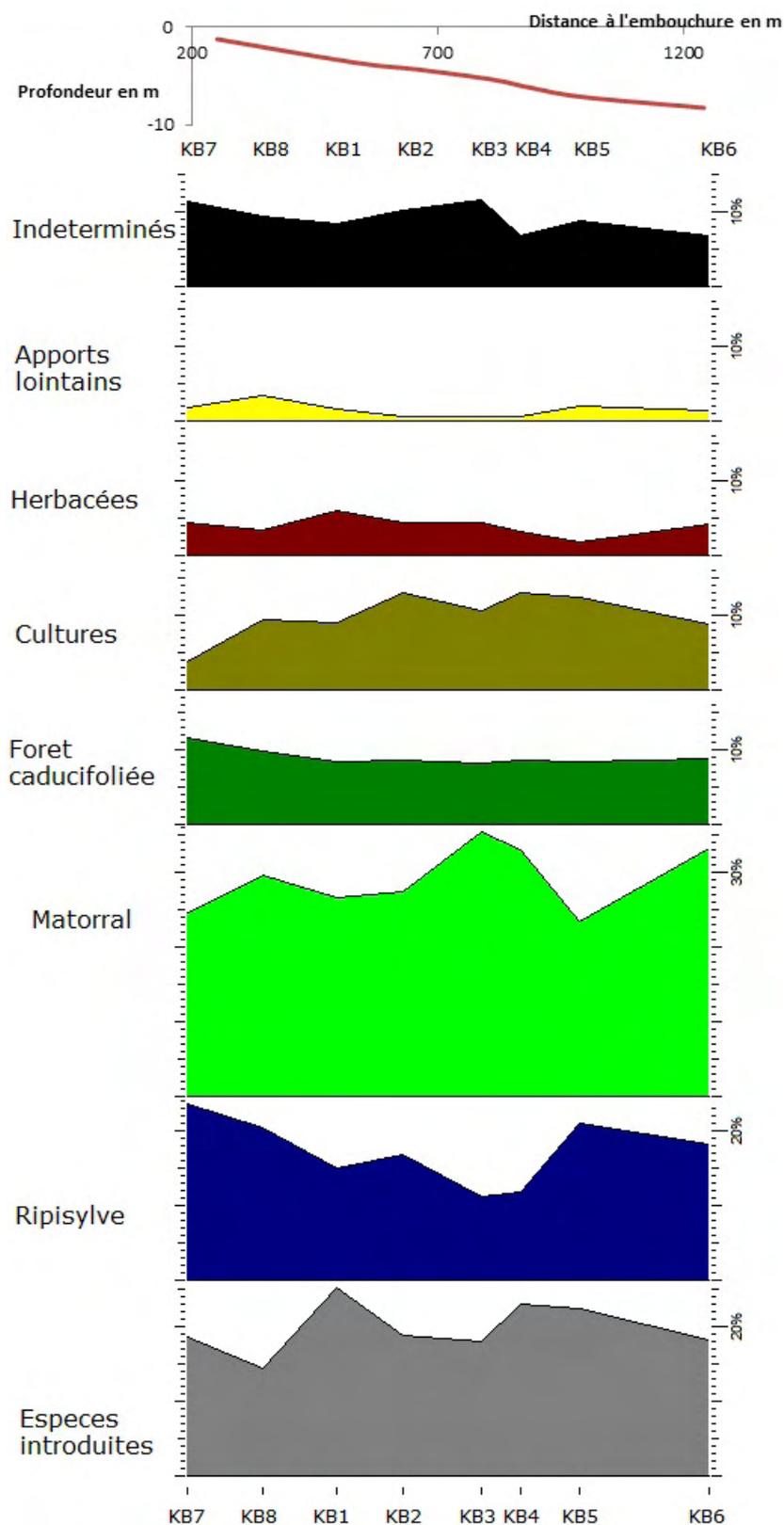


Figure 3. Diagramme pollinique par milieu

La façon dont les habitats de la carte sont représentés par le pollen dans les sédiments du lac est présentée par un graphique (Fig. 4). Les habitats surreprésentés (au-dessus de la

courbe référence) sont la Pinède, le Matorral à filaire et la Chênaie sclérophylle. Les habitats bien représentés sont ceux proches de la courbe de référence: la Lande à buis, la

Cédraie et la Châtaigneraie. A l'inverse, certains habitats sont moins représentés que ce qui était attendu. C'est le cas des Pelouses et des Cultures qui sont sous la courbe de référence. Le milieu Ripisylve n'est pas

représenté sur la **Figure 4** car son indice n'est qu'approximatif, mais il est d'environ 1 et son pourcentage pollinique est près de 10 %. Il se placerait donc au-dessus de la courbe de référence, avec les habitats surreprésentés.

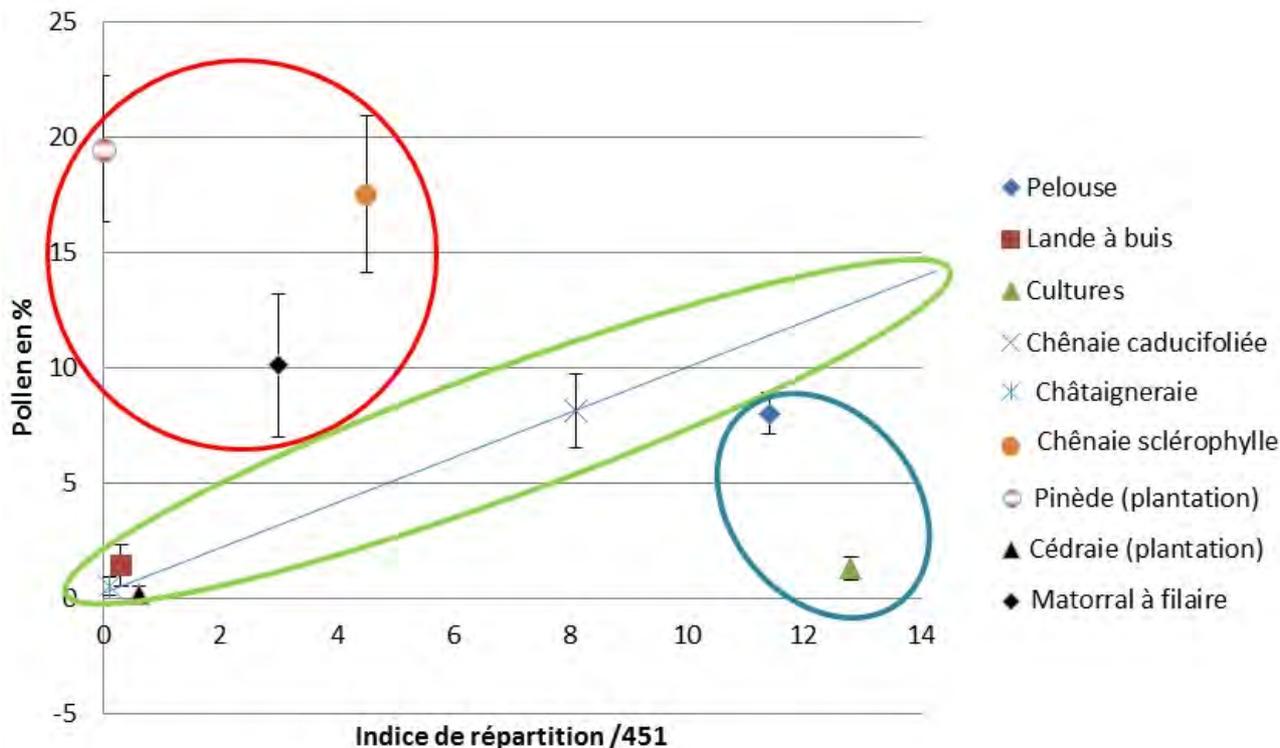


Figure 4. Pourcentage pollinique des habitats par rapport à leurs indices de répartition. Cercle rouge : habitats surreprésentés ; cercle bleu : habitats sous-représentés ; cercle vert : habitats bien représentés. La courbe bleue correspond à la courbe de référence tracée à partir de la chênaie caducifoliée.

DISCUSSION

1- Enregistrement pollinique de la végétation régionale

Les taxons dominants sur le diagramme pollinique sont *Alnus*, *Phillyrea*, *Pinus*, *Quercus ilex-coccifera*, *Quercus pubescens-type*, avec une présence importante des Céréales, d'*Olea* et de Poaceae. Cela représente plutôt bien les différents habitats de la végétation du bassin versant. Quelques éléments particuliers sont toutefois à noter : du pollen de hêtre (*Fagus*) et de bouleau (*Betula*) ont été trouvés dans les échantillons sédimentaires. Or, ces taxons n'ont pas été observés sur le bassin versant : les premières populations de ces arbres se trouvent dans le Haut-Languedoc ou dans les Cévennes, à plus

de 50 km du lac du Salagou. Ces occurrences polliniques révèlent un apport lointain d'origine éolienne. La présence de taxons indicateurs tels que *Quercus pubescens-type*, *Q. ilex-coccifera*, *Phillyrea*, etc. permet de reconstituer des formations végétales type (Janssen, 1970). Néanmoins, beaucoup de taxons observés dans le bassin versant ne se sont pas retrouvés dans le pollen sédimenté, notamment les espèces entomogames très présentes dans les pelouses (par exemple, Lamiaceae), ainsi que celles dont le pollen est trop fragile pour se conserver (par exemple, Cupressaceae).

2- Influence du transport fluvial sur l'enregistrement pollinique dans le lac

La diversité pollinique ne présente pas de

différence significative entre les KB : elle apparaît homogène sur l'ensemble du transect. Les tests de corrélation révèlent toutefois une influence de la distance à l'embouchure sur l'enregistrement de certains taxons : les pourcentages polliniques de la ripisylve (excluant *Alnus*) diminuent de manière significative (test de Fisher ; $p < 0,05$) en s'éloignant de l'embouchure. La corrélation n'est significative que pour *Fraxinus*, mais les p-values sont faibles ($p < 0,1$) pour *Corylus* et *Populus*. Les taxons retrouvés en ripisylve (*Corylus*, *Fraxinus*, *Populus*, et *Salix*) ont tous une pollinisation par le vent (anémogame), mais leur présence aux abords de la rivière fait que de nombreux pollens tombent dans l'eau et il peut y avoir un transport fluvial. C'est ce transport qui est mis en évidence par les corrélations précédentes. L'absence de significativité pour *Alnus*, qui est lui aussi anémogame, est surprenante car cette espèce est dominante dans les ripisylves du bassin versant. Le fait qu'elle soit caractérisée au contraire de *Fraxinus* et *Populus* par de très bonnes production et dispersion polliniques (Rodríguez-Rajo et al., 2004) pourrait expliquer cela : son enregistrement dans le lac traduit probablement un important apport éolien, bien supérieur à l'apport fluvial d'où la relative uniformité de la présence d'*Alnus* sur le transect étudié. Au vu de ces résultats, l'influence de l'apport fluvial apparaît négligeable par rapport à l'apport éolien pour la grande majorité des taxons, et en particulier pour les taxons mésophiles que l'on retrouve en ripisylves autant que dans d'autres milieux.

3- Représentativité de l'enregistrement pollinique d'origine éolienne

Trois groupes d'habitats sont distingués selon leurs représentativités dans le pollen (en utilisant comme référence la chênaie caducifoliée). Les habitats surreprésentés, sous-représentés et enfin, bien représentés. Ainsi, la pinède est fortement surreprésentée. Cette caractéristique est entraînée par la très forte production en pollen des différentes espèces du genre *Pinus* (De Beaulieu, 1977)

en raison, notamment de son anémogamie, mais également par la caractéristique du grain de pin qui possède deux ballonnets d'air. Ce dernier est donc porté par le vent sur de longues distances : on peut considérer qu'une partie de ces pollens est issue d'un apport lointain. Ensuite, se démarquent la Chênaie sclérophylle et le Matorral à filaire. Ces deux habitats peuvent être considérés comme surreprésentés, mais cela reste limité. Il est donc possible que ces résultats soient entraînés par les mélanges d'espèces, avec notamment du chêne vert au sein du Matorral à filaire. Les Cultures et les Pelouses sont en revanche sous-représentées. La présence de nombreuses espèces zoogames (généralement entomogames) en milieu ouvert peut être mise en cause, ainsi que la fragilité de certains pollens. Pour ce qui est des cultures (Vigne, *Vitis vinifera* ; Céréales ; Olivier, *Olea europaea*), deux éléments peuvent expliquer cela : tout d'abord, la sélection par l'homme de souches qui maximisent la production de fruits et par conséquent, libèrent moins de pollen (sélection de l'autofécondation) (Pelletier, 2007) ; il est également possible que certaines parcelles en jachère soient comptabilisées dans le pollen au sein des pelouses (mieux représentées que les cultures). Enfin la Châtaigneraie, la Lande à buis et la Cédraie suivent la courbe de référence mise en place grâce à la Chênaie caducifoliée : on peut donc les considérer comme étant bien représentés.

Pour la ripisylve, la valeur de l'indice théorique obtenue (divisée par 451) est de 1 environ (valeur maximale selon les « scénarios »). Or, la ripisylve occupe toujours plus de 10 % dans les enregistrements polliniques. Par conséquent, cet habitat peut être considéré comme surreprésenté. Cela s'explique par la forte production en pollen de certaines espèces anémogames, comme l'aulne ou les saules, mais surtout par l'apport fluvial, démontré précédemment.

CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence les relations qui pouvaient exister entre la végétation actuelle du lac et la présence de pollen dans les sédiments de ce dernier. Le transport éolien est celui qui régit majoritairement la dispersion du pollen. L'influence de ce dernier peut se faire sentir sur de très grandes distances, avec notamment un apport de pollen lointain. Cependant, un second transport a pu être mis en évidence ici, le transport fluviatile. En effet, les hypothèses émises ont été vérifiées. Toutefois, l'apport fluviatile s'est révélé assez faible. Malgré cela, il serait intéressant de prendre en compte ces données dans le cadre d'une reconstitution paléoenvironnementale, sachant que la ripisylve, dans le cas où la sédimentation provient d'une zone d'embouchure, est surreprésentée. Enfin, les différentes caractéristiques des habitats ont pu être mises en évidence avec une surreprésentation de la Pinède, et une faible représentation des milieux ouverts (surtout les Cultures). Toutefois, il est plausible que ces derniers soient mieux représentés dans les écosystèmes passés, puisque c'est en partie la sélection par l'homme qui est responsable de cette caractéristique de faible production en pollen des plantes cultivées. Ainsi, pour aller plus loin il serait intéressant de travailler plus précisément sur cet apport fluviatile afin de pouvoir le quantifier et l'utiliser pour la reconstitution des végétations passées.

RÉFÉRENCES

- Berglund B.E. & Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. In : B.E. Berglund (ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 455-484.
- Bottema S. (1982). Palynological investigations in Greece with special reference to pollen as an indicator of Human activity. *Paleohistoria*, 24 : 257-289.
- Braun-Blanquet J. (1932). *Plant sociology, the study of plant community*. McGraw Hill Book, New York, 432 p.
- Davis M.B., Moeller R.E. & Ford J. (1984). Sediment focusing and pollen influx. In : E.Y. Hayworth & J.W.G. Lund (éds.), *Lake Sediments and Environmental History*. University of Leicester Press, Leicester, pp. 261-293.
- De Beaulieu J.-L. (1977). *Contribution pollenanalytique à l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation des alpes méridionales françaises*. Thèse, Université d'Aix-Marseille III.
- Denis J., Lassauce H. & Ramadier E. (2013). Transect palynologique actuel au sein de la vallée du Galeizon. *Orpal Synthesis*, 6 : 25-36.
- Guiraud C. & Martin P. (2007). *Le lac du Salagou ou le majestueux destin d'une rivière qui coule la nuit et s'évapore le jour*. Les livrets du Clermontois, 67 p.
- Hammer Ø., Harper D.A.T. & Ryan P.D. (2001). Paleontological Statistics Software: Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 : 9.
- Janssen C.R. (1970). Problems in the recognition of plant communities in pollen diagrams. *Vegetatio*, 20 : 187-198.
- Janssen C.R. (1973). Local and regional pollen deposition. In : H.J.B. Birks & R.G. Wet (eds.), *Quaternary Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 31-42.
- Mato L., Navarro L. & Santucci F. (2014). Référentiel des diatomées et des charbons présents dans le sédiment subactuel du lac du Salagou. *Orpal Synthesis*, 7 : 27-37.
- Nalepka D. & Walanus A. (2003). Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica*, 43 : 125-134.
- Pelletier G., Durand-Tardif M. & Doré C. (2007). Évolution des pratiques de l'amélioration des plantes cultivées. *Acta Botanica Gallica*, 154 : 353-352.
- QGIS Development Team (2013). QGIS Geographic Information System. *Open Source Geospatial Foundation Project*.
- Rodríguez-Rajo F.J., Dopazo A. & Jato V. (2004). Environmental factors affecting the start of pollen season and concentrations of airborne *Alnus* pollen in two localities of Galicia (NW Spain). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 11 : 35-44.

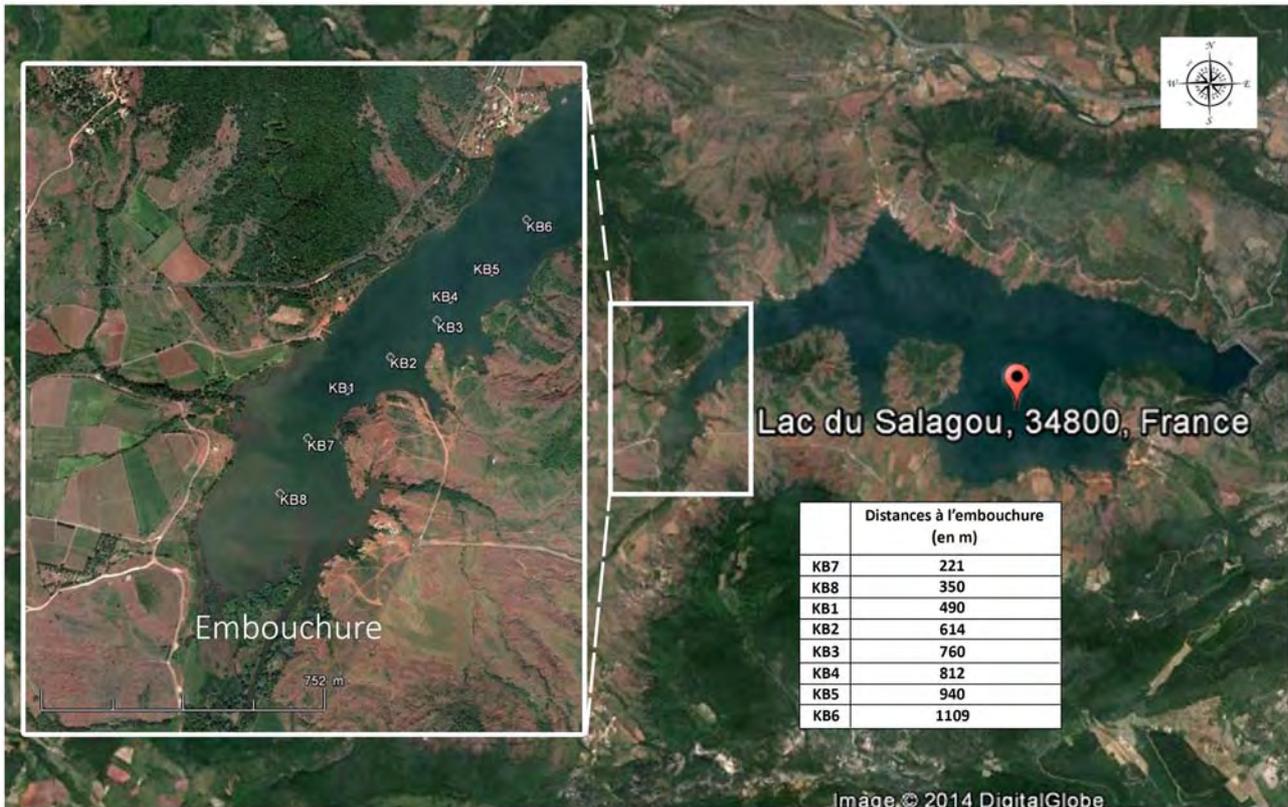
Shannon C.E. & Weaver W. (1949). *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press, Urbana.
Smith B. & Wilson J.B. (1996). A consumer's

guide to evenness indices. *Oikos*, 76 : 70-82.

StatSoft, Inc. (2001). Statistica 6.

ANNEXE 1.

Localisation des lieux d'échantillonnage des KB (d'après [Mato et al., 2014](#))



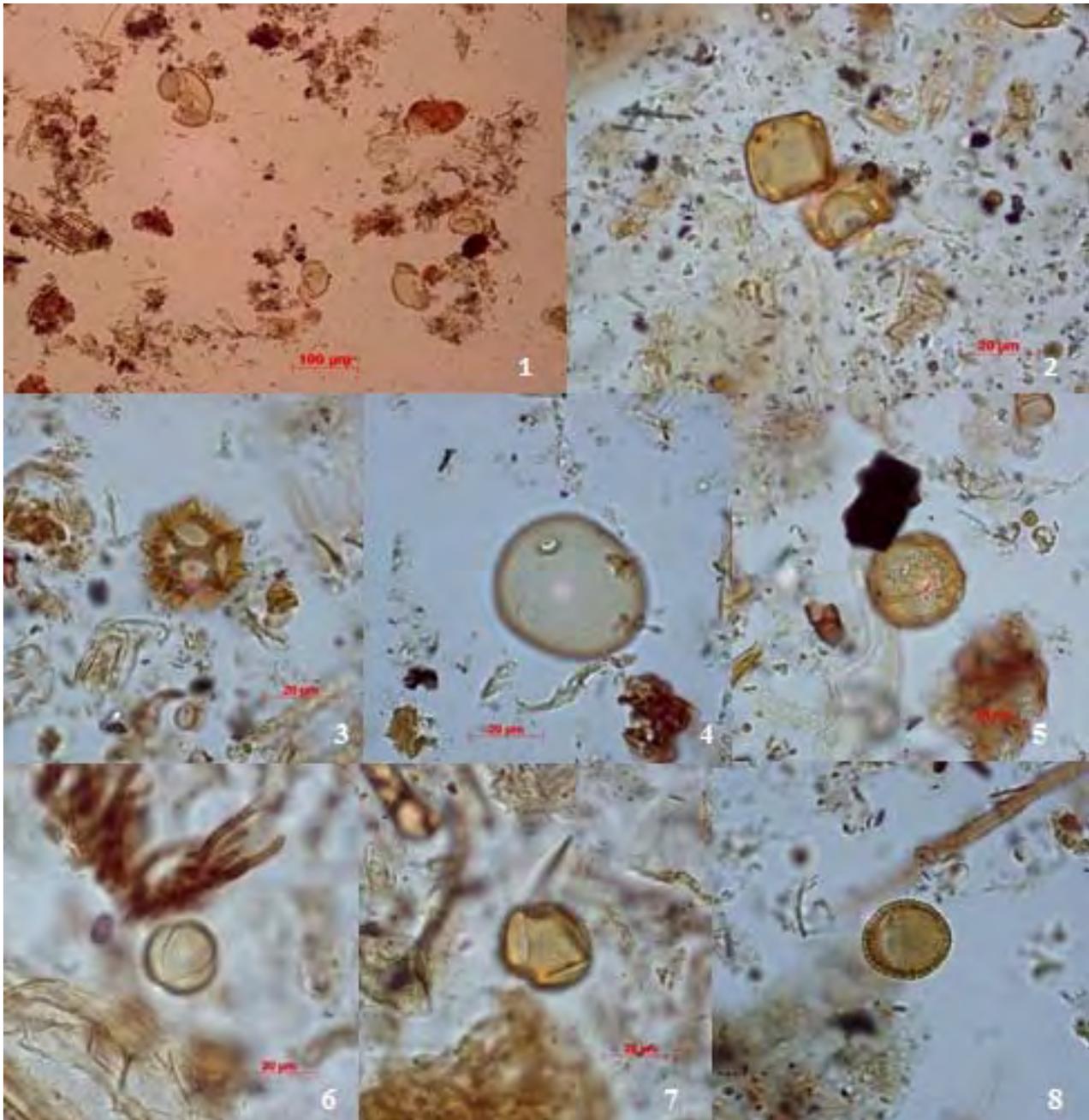
ANNEXE 2.

Protocole d'extraction du pollen

1 : Première phase	-Transfert des échantillons dans des tubes en polypropylène avec de l'eau. - Centrifugation (2200tours/min) pendant 5 minutes, suivit de l'élimination du surnageant.
2 : Défloculation à chaud	- Ajouter 10ml de KOH 10% et agiter. - Chauffer 20 min à 100 °C au bain marie en agitant régulièrement. - Vider dans un tamis métallique posé sur un bécher de 50 ml.
3 : Tamisage et rinçage	- Récupérer le matériel fin grâce au tamis avec un jet d'eau distillée et conserver les sables pour l'étude de la macro restes. - Centrifugation (2200 tours/min) pendant 5 min et élimination du surnageant. - On réitère l'opération du KOH à chaud suivit du rinçage a l'H2O jusqu'à obtention d'un culot clair.
4 : Elimination de la silice à froid	- Ajouter 5 – 8 ml d'HF et agiter. - Laisser reposer au minimum 12 à 36h. - Diluer les tubes avec de l'eau distillée et agiter. - Centrifugation (2200 tours/min) pendant 5 min et élimination du surnageant.
5 : Transfert du culot	- Transfert du culot dans des tubes en verre à fond rond et rinçage à l'eau distillée.
6 : Elimination des fluosilicates et acidification	- Ajouter 8-10ml d'HCL et agiter. - Chauffer 10 min à 100°C. - Centrifuger (2200 tours/min) pendant 5 min, élimination du surnageant. - Répéter cette étape 2 fois.
7 : Rinçage a l'eau distillée	- Ajouter 8-10ml d'eau distillée et agiter. - Centrifugation (2200 tours/min) pendant 5 min, élimination du surnageant.
8 : Rinçage a l'alcool	- Ajouter 8-10ml d'alcool et agiter. - Centrifugation (2200 tours/min) pendant 5 min, élimination du surnageant.
9 : Transfert du matériel dans les piluliers.	- transférer avec une pipetman de 1000µl. - centrifugation (2200 tours/min) pendant 5 min, élimination du surnageant. - séchage des piluliers à l'envers.
10 : Montage dans la glycérine	Ajouter quelques gouttes de glycérine dans chaque pilulier.

ANNEXE 3.

Photos de différents types de pollen observés au microscope photonique. 1, Plan large d'une lame (on y voit 3 grains de *Pinus*) ; 2, *Alnus* ; 3, Asteraceae ; 4, Céréale ; 5, *Quercus pubescens* ; 6, *Phillyrea* ; 7, *Quercus ilex-coccifera* ; 8, *Olea*.



ANATOMIE DU BOIS DE QUELQUES ESPECES LIGNEUSES DE LA REGION DU SALAGOU (HERAULT) : CARACTERES SYSTEMATIQUES, TRAITS BIOLOGIQUES ET SIGNATURES ECOLOGIQUES

Léa Daures¹, Pierre Lemaistre², Marion Lestienne³, Émilia Pachot⁴

*Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie, UMR 5059
Institut de Botanique. 163, rue A. Broussonet, 34090 Montpellier (France)*

¹ lea.daures@etud.univ-montp2.fr, ² pierre.lemaistre@etud.univ-montp2.fr,
³ marion.lestienne@etud.univ-montp2.fr, ⁴ emilia.pachot@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Sarah Ivorra et Jean-Frédéric Terral

Citation : Daures L., Lemaistre P., Lestienne M. & Pachot E. (2014). Anatomie du bois de quelques espèces ligneuses de la région du Salagou (Hérault) : caractères systématiques, traits biologiques et signatures écologiques. *Orpal Synthesis*, 7 : 53-67.

Résumé : L'objectif de cette étude est d'évaluer la signification systématique, phylogénétique et écologique de l'anatomie du bois de plusieurs espèces ligneuses (Gymnospermes et Angiospermes) typiques de formations végétales du pourtour du lac du Salagou (Hérault). Les caractères anatomiques du bois de chacune des espèces sont décrits à partir d'échantillons carbonisés en conditions contrôlées en laboratoire. Pour cela, une clé de détermination a été établie, puis comparée à un arbre phylogénétique simplifié composé seulement des espèces étudiées. Les relations entre caractères anatomiques, traits biologiques et écologie des espèces ont été analysées à l'aide d'une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples. Les caractères anatomiques peuvent être considérés comme des traits biologiques et écologiques influencés par les conditions environnementales, impliqués dans l'adaptation au milieu et modulés par la sélection naturelle.

Mots clés : anthracologie, anatomie écologique, phylogénie, Méditerranée

Abstract: *Wood anatomy of some ligneous species of the Salagou region (Hérault): taxonomical features, biological traits and ecological signatures.* This study aims at evaluating the systematic, phylogenetic and ecological significance of the wood anatomy of several ligneous species (Gymnosperms and Angiosperms) typical of plant formations of the surroundings of the Salagou Lake (Hérault). The wood anatomical characters of each species are described from samples carbonised in laboratory, under controlled conditions. For that purpose, an identification key was established, then compared with a simplified phylogenetic tree comprising only the studied species. The relationships between anatomical characters, biological traits and species ecology was analysed by means of a Multiple Correspondence Analysis. The anatomical characters can be considered as biological and ecological features influenced by environmental conditions, implicated in adaptation and modulated by natural selection.

Key words: anthracology, ecological anatomy, phylogeny, Mediterranean

L'anthracologie est le domaine de la paléoécologie fondé sur l'étude des charbons de bois (Chabal et al., 1999). De manière complémentaire avec d'autres méthodes comme la palynologie (Pons, 1970) ou l'analyse isotopique (Bocherens et al., 1999), l'identification et l'analyse des charbons de bois permet la reconstitution de la végétation, du climat et des interactions passées Homme - milieu. Les charbons de bois sont essentiellement constitués de carbone. Ils se conservent au cours du temps à condition qu'ils ne soient pas dégradés par les processus taphonomiques ou par le remaniement des sédiments où ils ont été déposés et enfouis. Ils se révèlent utiles lors de la découverte de sites archéologiques ou de traces de paléo-incendies pour comprendre l'environnement du passé, les facteurs responsables de changements écologiques et/ou les modes d'exploitation des peuplements forestiers par les communautés humaines.

Le charbon de bois a la particularité de conserver après carbonisation les caractéristiques anatomiques de l'espèce dont il est issu. La structure et l'agencement des cellules constitutives du bois ont une valeur taxonomique. Il est possible d'identifier les taxons étudiés au niveau du genre ou de l'espèce. Par ailleurs, à travers l'examen des caractéristiques anatomiques des espèces ligneuses (caractéristiques qualitatives et quantitatives), il semble possible de procéder à une lecture biologique (phénologie, efficacité de conduction de la sève par exemple) et écologique (caractéristiques édaphiques du milieu, paramètres climatiques...) de ces espèces (Carlquist, 2001; Terral & Durand, 2006). Les variations anatomiques peuvent également renseigner sur les perturbations ou les variations de divers facteurs environnementaux. En conséquence, l'anatomie a non seulement une signification taxonomique, mais également biologique et écologique.

Le but de ce travail est d'évaluer ces propriétés sur la base d'échantillons de bois collectés sur des espèces appartenant à

différentes formations végétales autour du lac du Salagou (Hérault). Pour ce faire, dans un premier temps, une clé de détermination des échantillons a été réalisée, qui a été ensuite comparée à la phylogénie (APG III, 2009 pour les Angiospermes, et Tela Botanica pour les Gymnospermes ; <http://www.tela-botanica.org>). Dans une seconde phase, les relations entre caractères anatomiques, traits biologiques et préférences écologiques des espèces sont testées à l'aide d'une analyse statistique multivariée.

MATERIEL ET METHODES

1- Contexte géographique et géologique de la zone d'étude

L'histoire géologique de la région explique la présence de dépôts rouges argileux appelés "ruffes" (du latin *rufus* : rouge ; quelques toponymes existent dans la région), riches en oxyde de fer, et de formations basaltiques. Les ruffes ont été mises en place au Permien (280-255 Ma) et ont été recouvertes au Trias par des dépôts sédimentaires (grès, argiles, calcaires et dolomies). Ce sont ces roches, organisées en couches horizontales plus ou moins érodées, qui forment les paysages actuels. Au milieu de ce paysage rouge, on trouve des roches volcaniques noires datant de 2,2 et 1,4 Ma, sous forme de coulées basaltiques et d'anciennes cheminées, les necks (Bousquet, 2008). La zone étudiée comprend un ensemble de formations végétales organisées en mosaïque autour du lac du Salagou (Hérault), lac artificiel mis en eau en 1969 (Fig. 1). La région est soumise à un climat méditerranéen, contrasté et caractérisé par des hivers doux et pluvieux, et par des étés chauds et secs (Collectif des Garrigues, 2013 ; lesgaletsdusalagou.fr).

2- Matériel collecté

Le matériel végétal (tronçons de bois) a été prélevé sur 28 espèces de 4 formations végétales représentatives du pourtour du lac du Salagou (Fig. 1). Celles-ci sont (1) la pinède : il s'agit d'une zone post-culturale recolonisée par des pins d'Alep (*Pinus*

halepensis) et des pins pignons (*Pinus pinea*), se trouvant au sud-est du site ; (2) la chênaie sclérophylle (Thiébaud et al, 2001), composée en majorité de chênes verts (*Quercus ilex*) et d'espèces à feuillages persistants ; (3) la chênaie caducifoliée (Duvigneaud et al, 1964), moins thermophile que la chênaie sclérophylle et dominée par le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) ; (4) la ripisylve, bordant le lac et les cours d'eau et constituée majoritairement d'espèces hygrophiles. 7 espèces ont également été récoltées en dehors de ces formations, 6 espèces sauvages et 1 espèce cultivée (Rameau et al., 2008). Ces formations sont représentées sur une carte : plus la formation contient d'espèces récoltées et plus le cercle qui la représente est grand.

L'échantillonnage a été effectué en 3 jours, le 1er jour ayant été consacré au repérage. Pour chaque espèce, plusieurs segments de bois de

3 cm de long et de 1-4 cm de diamètre, taille suffisante pour une analyse anthracologique, ont été collectés. Ceux-ci ont été collectés dans les unités de croissances Un-1/Un-2 (1 à 3 cernes visibles). Les segments de bois ont été conservés dans des sacs en papier. Pour chaque formation végétale ou point de collecte, un relevé GPS a été effectué, afin de permettre la géo-localisation de la zone. Chaque prélèvement de bois a été accompagné d'un échantillon plus grand qui a été mis en herbier pour valider l'identification.

Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve durant une semaine avant d'être carbonisés. La dessiccation permet de conserver les échantillons de bois longtemps sans qu'ils ne pourrissent (principe de conservation similaire à l'herbier).

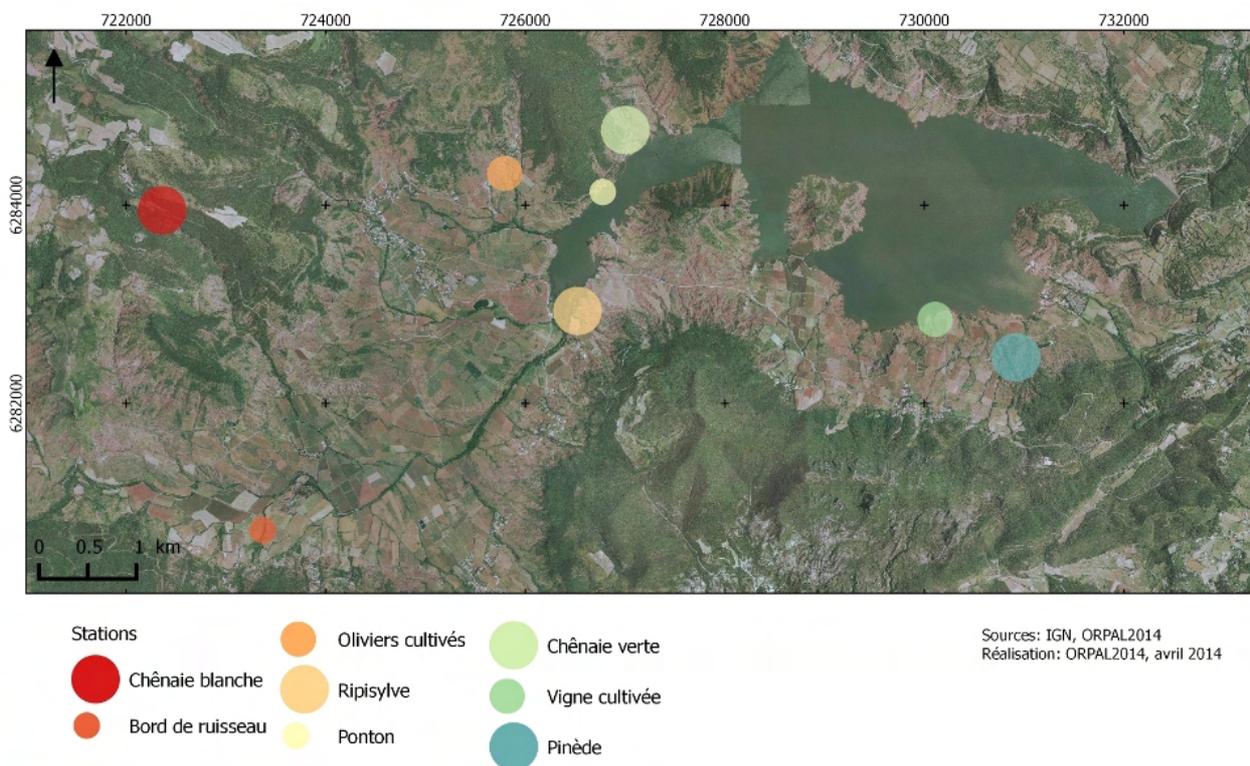


Figure 1. Localisation des zones d'échantillonnage

3- Préparation et carbonisation des échantillons

Afin de pouvoir observer les échantillons, il est nécessaire de les carboniser. Pour cela, des segments de bois possédant un diamètre similaire ont été sélectionnés pour assurer un temps de carbonisation équivalent des échantillons. Ceux-ci sont enveloppés dans des feuilles d'aluminium, enroulées et bien serrées pour les isoler de l'air. Les échantillons sont ensuite placés dans deux creusets en aluminium remplis de sable, puis recouverts de ce même sable, pour être calés et gardés à une température homogène. Les deux bacs sont mis dans un four à moufle (Stuart SF14/S Bibby).

Selon cette procédure, des conditions anaérobies (réductrices) sont établies, évitant de ce fait au bois d'être en contact avec l'oxygène (conditions oxydantes). La combustion réalisée est donc partielle : les échantillons sont pyrolysés (enrichissement maximal en carbone en conditions réductrices). En conduction oxydante, les échantillons auraient été rapidement réduits en cendres (obtention de la fraction minérale par combustion totale) (Chabal et al., 1999).

Le four à moufle est réglé à 440°C. Un temps de refroidissement est nécessaire pour éviter un choc thermique susceptible d'entraîner l'explosion des échantillons. Les échantillons de bois ainsi carbonisés ont conservé les caractéristiques anatomiques du bois originel. Leur examen microscopique peut alors débiter.

4- Anthraco-analyse des échantillons

L'utilisation de microscopes optiques (Olympus BX60 F5) à réflexion est nécessaire pour observer des objets opaques et épais comme le charbon de bois (grossissements x50/x100/x200/x500). L'échantillon éclairé par le dessus réfléchit la lumière au lieu d'être traversé comme en microscopie à transmission.

Il faut prendre en compte le fait que le séchage entraîne une diminution du volume du bois de 10 à 20 %, et que la carbonisation

provoque une réduction de taille supplémentaire (Thinon, 1992). Les coupes de charbons observées ont un volume nettement inférieur aux échantillons originels. Dans ces conditions, il est possible d'observer des fissures, voire des éclatements dans les échantillons carbonisés. Avant observation, les échantillons sont fracturés manuellement afin d'obtenir une cassure fraîche la plus plane possible. L'examen de l'anatomie se fait selon trois plans : transversal, longitudinal radial et longitudinal tangentiel.

La coupe transversale permet de voir la taille, la répartition et la disposition des vaisseaux, des fibres ou des trachéides* (les termes marqués d'un astérisque sont définis à l'Annexe 1). L'étude des cernes peut apporter des informations sur la phénologie de l'arbre, les paramètres modulant leur mise en place et diverses perturbations subies.

La coupe longitudinale radiale permet surtout d'observer les rayons ligneux*, qui constituent le système horizontal du bois (plan de coupe parallèle aux rayons). Ainsi, il est possible de qualifier la forme des rayons et leur longueur. Tout comme en coupe longitudinale tangentielle, les vaisseaux, les fibres et les trachéides sont visibles longitudinalement. Ainsi, l'observation des perforations, ponctuations* et l'observation des différents ensembles cellulaires présents est réalisable.

5- Analyse Factorielle des Correspondances Multiples

Afin de tester la relation entre les caractères anatomiques, l'écologie et d'autres traits biologiques des espèces étudiées, une analyse statistique multivariée, l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) a été utilisée. Pour ce faire, un tableau mettant en relation les traits anatomiques, écologiques et biologiques a été établi en utilisant des codages. Les données ont été ensuite organisées sous forme d'un tableau disjonctif complet constitué de profils lignes (les observations : en l'occurrence des espèces) et de profils colonnes (les variables qualitatives : les différentes modalités des caractères

anatomiques, des variables environnementales et des traits biologiques). Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Excel (module xlstat2014). La nomenclature respecte Tela Botanica (<http://www.tela-botanica.org>).

RESULTATS

1- Analyse des échantillons collectés

Deux groupes ressortent : 5 espèces à bois homoxylé* (Gymnospermes) et 23 espèces à bois hétéroxylé* (Angiospermes). Une clé de détermination des 28 espèces basée sur différents caractères anatomiques a été obtenue après observation des échantillons de charbons de bois (**Annexe 2**). Toutes les données recueillies sont basées sur nos observations, ainsi que sur des clés déjà existantes (**Schweingruber et al., 1990**). Les caractères retenus pour la construction de cette clé sont :

Pour les bois homoxylés :

- la présence/absence de canaux résinifères*. La présence de canaux résinifères caractérise les pins, car les genévriers (*Juniperus oxycedrus* et *J. phoenicea*) en sont généralement dépourvus. Le Cèdre (*Cedrus atlantica*) se retrouve dans les deux groupes. En effet, certains échantillons présentent des canaux traumatiques, et certains n'en ont pas.
- la hauteur des rayons ligneux.
- le type de ponctuations des champs de croisements*.
- la présence/absence de trachéides dentées. Ce dernier caractère est difficilement détectable et a servi à différencier les deux espèces de pin (*Pinus pinea* et *Pinus halepensis*).

Pour les bois hétéroxylés :

- la disposition, la taille et le type de perforation des vaisseaux.
- la taille, la forme et les ponctuations des rayons.
- la présence ou non d'épaississements spiralés.

Cette clé a permis de mettre en évidence des "couples" d'espèces anatomiquement

proches : *Castanea sativa* / *Quercus pubescens* ; *Clematis flammula* / *Vitis vinifera*, *Cornus sanguinea* / *Buxus sempervirens* ; *Corylus avellana* / *Olea europaea* ; *Prunus dulcis* / *Arbutus unedo* ; *Rhamnus alaternus* / *Phillyrea latifolia* ; *Salix alba* / *Populus nigra*. D'autres espèces sont plus facilement identifiables, comme *Acer campestre*, *Alnus glutinosa*, *Ficus carica*, *Hedera helix* et *Quercus ilex*.

2- Phylogénie

L'arbre phylogénétique (**Fig. 2**) présente la position phylogénétique de chacune des 28 espèces étudiées. Deux groupes ressortent : les Gymnospermes et les Angiospermes. Parmi les Gymnospermes, seul l'ordre des Pinales est représenté avec deux familles : les Pinaceae (3 espèces) et les Cupressaceae (2 espèces). Parmi les Angiospermes, on distingue les Angiospermes basales (Magnoliidées) des Eudicots. Douze ordres sont représentés (Laurales, Ranunculales, Buxales, Fagales, Rosales, Malpighiales, Sapindales, Vitales, Cornales, Ericales, Lamiales et Apiales), 16 familles et 23 espèces. Des "groupements" de taxons proches ressortent, tels que ; *Alnus glutinosa* / *Corylus avellana* ; *Olea europaea* / *Fraxinus angustifolia* / *Phillyrea latifolia* ; *Quercus* spp. / *Castanea sativa* et *Salix alba* / *Populus nigra* (<http://www.plantes-botanique.org/>).

3- Comparaison avec la phylogénie

La clé de détermination (**Annexe 2**) a été mise sous la forme d'un arbre, afin de la comparer aux phylogénies récentes. Il y a peu de différences entre la phylogénie et la clé en ce qui concerne les Gymnospermes (à bois homoxylé). En revanche, des disparités entre la clé et la phylogénie simplifiée sont notables chez les Angiospermes. Le caractère "disposition des vaisseaux en flammes" sépare les Angiospermes en deux groupes qui ne semblent pas cohérents d'un point de vue systématique : d'une part, *Castanea sativa*, *Phillyrea latifolia*, *Quercus pubescens* et *Rhamnus alaternus*, et d'autre part, *Acer campestre*, *Alnus glutinosa*, *Arbutus unedo*,

Buxus sempervirens, *Clematis flammula*, *Cornus sanguinea*, *Corylus avellana*, *Ficus carica*, *Fraxinus angustifolia*, *Hedera helix*, *Laurus nobilis*, *Olea europaea*, *Pistacia terebinthus*, *Populus nigra*, *Prunus dulcis*, *Salix alba* et *Vitis vinifera*. Certaines espèces, ayant des caractères anatomiques assez variables, ont été placées plusieurs fois dans la clé : par exemple, *Quercus pubescens* qui peut avoir des vaisseaux flammés ou non. Par

ailleurs, les Anacardiaceae, les Araliaceae, les Cornaceae, les Ericaceae, les Fagaceae, les Lauraceae, les Moraceae, les Ranunculaceae, les Rhamnaceae, les Rosaceae et les Sapindaceae ont des perforations simples*, alors que les Betulaceae, les Buxaceae et les Vitaceae ont des perforations scalariformes*. Les Oleaceae et les Salicaceae sont composées d'espèces présentant ces 2 types de perforation.

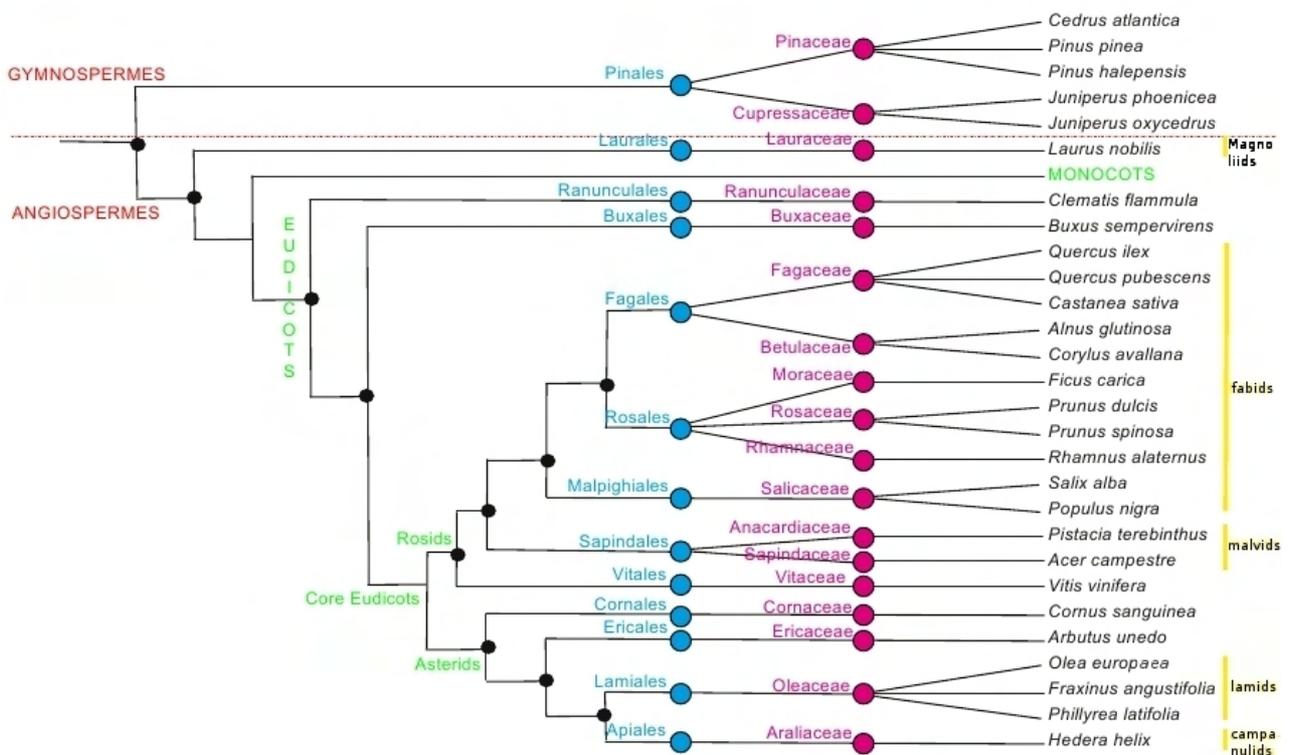


Figure 2. Phylogénie des 28 espèces étudiées

4- Relation caractères anatomiques-traités biologiques et écologiques chez les Angiospermes étudiées

L'effectif de Gymnospermes échantillonnés étant très faible, et ceux-ci appartenant aux mêmes formations, l'analyse a porté exclusivement sur les Angiospermes. Un test du χ^2 , préalable indispensable à la réalisation, à l'analyse et à l'interprétation de l'AFCM, montre l'indépendance des espèces et des

variables qualitatives ($\chi^2= 308$; ddl= 462 ; p-value=1). L'AFCM réalisée a permis de réduire le nombre de dimensions initiales (23) et de représenter sur un graphique symétrique les observations et les variables dans un plan factoriel à deux dimensions. 41 % de l'information initiale (inertie) sont représentés dans le plan factoriel 1-2 (Fig. 3). C'est à partir de ce dernier qu'est décrite la structure des données : plus les points sont rapprochés,

plus leur correspondance est élevée. Trois grands groupes se différencient :

Le premier groupe (à gauche, en orange sur la Fig. 3) réunit *Arbutus unedo*, *Buxus sempervirens*, *Phillyrea latifolia*, *Pistacia terebinthus*, *Quercus ilex* et *Rhamnus alaternus*, ainsi que les caractères “matorral”, “arbuste”, “feuillage persistant” et “vaisseaux étroits”.

Le deuxième groupe (à droite, en vert sur la Fig. 3) comprend *Acer campestre*, *Alnus glutinosa*, *Corylus avellana*, *Ficus carica*,

Hedera helix, *Laurus nobilis*, *Olea europaea*, *Populus nigra*, *Prunus dulcis* et *Salix alba*, associées aux caractères “liane”, “bois à zones poreuses”, “vaisseaux larges”, “rayons unisériés”, “feuillage caduc” et “chênaie caducifoliée”. Certains caractères et certaines espèces se trouvent entre les deux groupes décrits ci-dessus. On y retrouve des modalités très éloignées des deux groupes comme “taille de vaisseaux intermédiaires”, “cernes indistincts”.

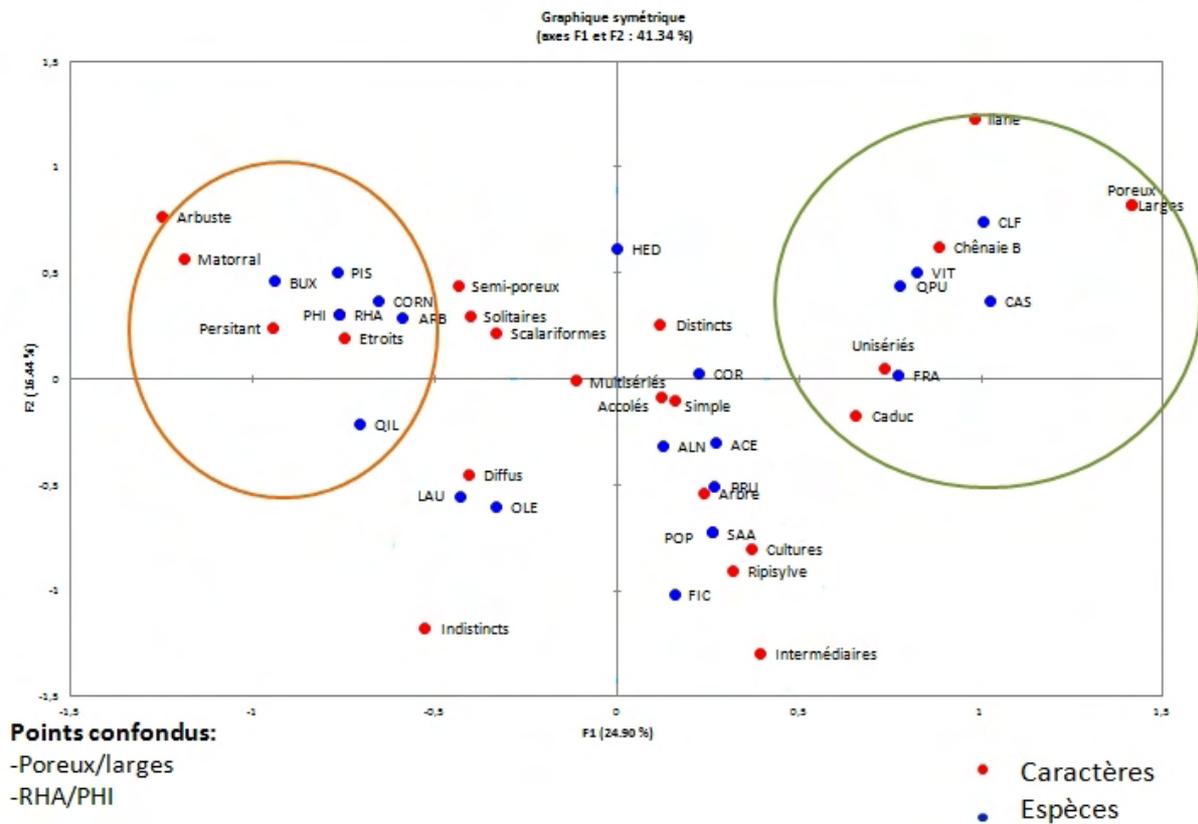


Figure 3. Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM)

Le troisième groupe (au centre, en bleu sur la Fig. 3), qui comprend *Castanea sativa*, *Clematis flammula*, *Fraxinus angustifolia*, *Quercus pubescens* et *Vitis vinifera*, se distingue par des modalités telles que “cultivé”, “ripisylve” et des caractères anatomiques comme les rayons multisériés (Navi et al, 2005).

DISCUSSION

1- La clé de détermination a-t-elle une valeur systématique ?

Les résultats différencient clairement les espèces à bois homoxylé des espèces à bois hétéroxylé, correspondant respectivement aux groupes des Gymnospermes et des Angiospermes. D’un point de vue phylogénétique, ces deux groupes forment donc des ensembles monophylétiques reconnus par l’anatomie (APG III, 2009).

En se focalisant sur les Angiospermes, de nombreuses différences ressortent lorsque l'arbre obtenu à partir de la clé de détermination et l'arbre simplifié réalisé à partir de la phylogénie sont comparés. En effet, des espèces telles que *Buxus sempervirens* et *Laurus nobilis* se retrouvent parmi les espèces apicales (dérivées) sur la clé, alors qu'elles font partie de lignées basales, en particulier *Laurus nobilis* qui appartient aux Magnoliidées (Angiospermes basales). Cette disparité s'explique probablement par le choix des caractères utilisés. En effet, certains caractères peuvent traduire des évolutions convergentes, c'est-à-dire qu'ils apparaissent de manière indépendante dans plusieurs groupes (Barbault, 1991). Ce phénomène se produit généralement lorsque les contraintes environnementales sont similaires. Dans ce cas, regrouper des espèces grâce à ce caractère devient alors inapproprié. L'exemple du caractère "disposition des vaisseaux en flamme" présent dans différents groupes est évocateur. D'autre part, le caractère "perforations scalariformes", considéré comme un caractère ancestral (Boureau, 1957), est présent chez des espèces dérivées comme les Betulaceae (ordre des Fagales). A l'inverse, il n'est pas observé chez *Laurus nobilis* (Lauraceae), seul représentant des Angiospermes basales de l'étude. Il semble donc que ce caractère n'ait pas de signification phylogénétique.

Mais alors, pourquoi n'y a-t-il pas de différence majeure entre les deux arbres pour les Gymnospermes? Une hypothèse possible serait que les caractères choisis étaient plus pertinents, ou qu'il y ait peu de convergence dans ce groupe. Mais il faut souligner que le risque d'erreur est beaucoup plus faible, car il y a quatre fois moins d'espèces récoltées chez les Gymnospermes que chez les Angiospermes. Il y a de ce fait moins de combinaisons possibles. Enfin, la phylogénie APGIII est construite sur la base de marqueurs moléculaires (Santoni et al, 2000). Elle permet d'étudier le polymorphisme à différents niveaux systématiques, et n'est donc pas nécessairement associée à des caractéristiques morphologiques, anatomi-

ques, physiologiques, éco-physiologiques ou biochimiques.

2- Les caractères anatomiques traduisent-ils des exigences écologiques, correspondent-ils à des traits biologiques ?

L'anatomie du bois est, comme pour tout caractère morpho-anatomique, plastique entre les individus d'une même espèce (plasticité phénotypique). Ces variations s'expliquent par l'impact de l'environnement qui peut modifier les apports en ressources. L'environnement peut ainsi obliger les plantes à moduler leur phénotype et leur phénologie, et donc à adapter leur biologie à leur milieu de vie.

Caducue ou persistant? En région tempérée, plus les hivers sont froids, plus les jours sont courts, et plus il semble crucial pour la plante de perdre l'ensemble de ses feuilles et d'arrêter sa croissance dès l'arrivée de la mauvaise saison. Les maintenir et effectuer de manière efficace la photosynthèse en hiver seraient trop coûteux en énergie. Les espèces sempervirentes, elles, ne perdent pas leurs feuilles, car le climat méditerranéen permet une activité photosynthétique toute l'année. Leurs feuilles réduites et sclérifiées évitent la déperdition d'eau. Ces deux stratégies utilisent des compromis différents mais visent chacune à maximiser l'activité photosynthétique tout en minimisant les pertes énergétiques (Damesin et al., 1998).

Le type de feuillage a un impact sur la visibilité des cernes. Les caducifoliées possèdent des cernes généralement très marqués. A l'inverse, chez les espèces à feuillage persistant, la croissance se ralentit durant certaines périodes. Par conséquent, les cernes sont peu visibles, voire indistincts.

Dans l'AFCM, sachant que les points proches impliquent une forte relation, les espèces possédant un bois à zone poreuse possèdent des vaisseaux larges ; ceci est vrai si l'on considère la taille des vaisseaux du bois initial. Dans ce cas, l'explication biologique est la forte montée de sève au printemps, lorsque les ressources hydriques sont

optimales et que la croissance et l'activité photosynthétique reprennent. Une correspondance est également réelle pour "Matorral" et "Arbuste" signifiant effectivement que les formations pré-forestières de type matorral (garrigue et maquis), sont constituées de ligneux qui ne sont pas d'une grande taille (chaméphytes, nano- et méso-phanérophytes essentiellement ; Raunkiær, 1904). A l'inverse, les points opposés (par rapport un axe factoriel), tels que les modalités "Persistant" et "Chênaie caducifoliée", mènent à l'exclusion d'une modalité par l'autre. En effet, dans la chênaie caducifoliée, les espèces à feuillage persistant semblent être minoritaires (seule *Hedera helix* a été répertoriée).

Sur l'axe 1, les coordonnées négatives regroupent plusieurs espèces reliées par les mêmes caractéristiques anatomiques et appartenant au matorral méditerranéen. On peut en déduire que cette zone comporte principalement des arbustes à feuillage persistant (à l'exception de *Cornus sanguinea*), possédant de petits vaisseaux disposés en mode semi-poreux ou diffus*. Les espèces concernées sont *Arbutus unedo*, *Buxus sempervirens*, *Cornus sanguinea*, *Phillyrea latifolia*, *Pistacia terebinthus*, *Quercus ilex* et *Rhamnus alaternus*. *Laurus nobilis* et *Olea europaea* montrent une tendance à l'attraction par rapport à ce groupe, même si la seconde a été classée initialement comme une espèce cultivée, et la première comme appartenant à la ripisylve. D'un point de vue anatomique, mais également morphologique, ces espèces présentent des affinités avec les espèces de matorral, comme une absence de distinction entre bois initial et final, des vaisseaux plutôt étroits signifiant qu'elles sont adaptées à des ressources hydriques modérées et à des températures élevées (espèces thermophiles), la sclérophylle (et donc feuillage persistant).

Les coordonnées positives de l'axe 1 regroupent les espèces plutôt mésophiles (qui se développent sous des conditions climatiques tempérées), à feuillage caduc et possédant un bois à zone poreuse* et à vaisseaux larges (bois initial). Elles se situent

principalement dans la chênaie caducifoliée qui est un milieu plus forestier donc plus fermé, où la température est moins élevée, l'air plus frais et le sol plus humide (http://faunaflora.islec.free.fr/Habitats/Documents/Forets/Fiche_habitat_41.71.pdf). Les ressources hydriques plus abondantes expliquent pourquoi les vaisseaux sont moins nombreux et plus larges, ces derniers étant mis en place au début du cycle de croissance, laquelle s'était arrêtée totalement quelques mois plus tôt, au cours de l'automne. L'espèce caractéristique de cette formation est le chêne blanc (*Quercus pubescens*). Le frêne (*Fraxinus angustifolia*) et la vigne (*Vitis vinifera*), initialement affectés à la formation "ripisylve" et au groupe "cultivé", se retrouvent logiquement dans ce groupe, car étant des espèces hygrophiles (qui préfèrent les lieux humides), ils peuvent appartenir à la chênaie caducifoliée.

Enfin, les points situés sur l'axe 2 forment une troisième zone correspondant à la formation type "ripisylve". La disposition des points indique que la ripisylve est composée d'espèces ligneuses ayant plutôt des vaisseaux accolés, de taille intermédiaire, et possédant des perforations simples. Leurs rayons ligneux sont plutôt multisériés, donc nombreux, ce qui traduit un plus grand espace de réserve. Les cernes de ces espèces sont visibles, en lien avec leur feuillage caduc. La perforation simple est un état dérivé de la perforation, les espèces l'ayant ont donc cette plésiomorphie en commun (synplésiomorphie), ce qui les rapproche phylogénétiquement. On pourrait avancer l'hypothèse qu'un type d'environnement entraîne une anatomie similaire, répondant aux mêmes contraintes environnementales. Ceci-dit, le point "indistinct" pour les cernes se trouve aussi proche de l'axe : il y a donc aussi des espèces sempervirentes. La zone intermédiaire sur l'axe 1 est une zone mixte avec une certaine diversité. L'espèce *Hedera helix* se trouve dans cette zone : c'est une liane, comme la Clématite (*Clematis flammula*). Les lianes peuvent donc se trouver dans différents types de milieux, avec comme point commun de l'humidité et une certaine disponibilité en eau. Ces plantes se développent en utilisant des

supports, elles n'ont donc pas besoin d'être trop lignifiées et privilégient la croissance en longueur plutôt qu'en épaisseur. Les vaisseaux accolés permettent une meilleure conduction en eau, et la forte disponibilité en eau amène à une taille intermédiaire des vaisseaux (Cremers, 1974).

De plus, en ce qui concerne 3 espèces de Gymnospermes (*Cedrus atlantica*, *Pinus halepensis* et *Pinus pinea*), les variations météorologiques saisonnières interannuelles ont un impact sur leur croissance radiale (Delor et al., 2014). En effet, suivant leur écologie respective, la croissance en épaisseur du bois n'est pas la même. La taille des trachéïdes varie selon la disponibilité en eau, et les cernes sont plus ou moins larges en fonction du milieu. De grands cernes, significatifs de bonne croissance, peuvent toutefois varier d'une année à l'autre selon les conditions météorologiques : c'est pourquoi chaque cerne est différent chez un arbre. Par exemple, le pin d'Alep a besoin d'un milieu sec et ensoleillé, il va donc être plus sensible à la pluviométrie au printemps et en été, et aux basses températures durant la saison froide. L'environnement influencerait donc autant sur la taille des cernes que sur la disposition et taille des tissus conducteurs, mais ce, sur un plus long terme (sur plusieurs années).

CONCLUSION

L'anthracologie donne une image des végétations actuelles et des paléovégétations. Dans le cadre de cette étude, seul l'environnement actuel a été observé. Toutefois, une application dans le temps passé est possible si des échantillons de charbons provenant d'anciens feux domestiques ou forestiers sont retrouvés. Les résultats de cette étude font ressortir la grande diversité anatomique du bois présent sur le pourtour du lac du Salagou. Des relations entre les caractères anatomiques et la phylogénie ont été mis en évidence, et il a été possible d'identifier différentes synapomorphies caractéristiques de certaines familles. Par ailleurs, il a été possible de mettre en évidence des adaptations propres à certains

environnements. En effet, certains traits anatomiques comme les vaisseaux liés à la fonction de conduction sont directement influencés par l'environnement (ressource hydrique, sol, etc.). Il est alors possible de regrouper des caractères anatomiques propres à certaines espèces avec des formations ou écosystèmes particuliers (arbuste avec la garrigue, arbre avec chênaie caducifoliée...). Mais cette méthode ne permet que l'étude d'espèces ligneuses..

Les liens entre les différentes espèces récoltées ont également été étudiés. Mais les forces qui gouvernent l'assemblage des communautés (groupe de populations présentes sur une même zone géographique) sont complexes, et il serait important de comprendre les relations entre ces groupes. Notons que l'étude des communautés pourrait également servir d'indicateur de l'état écologique du lieu. Enfin, il faut prendre en compte le fait que cette approche est récente, et que la phylogénie évolue en même temps que notre compréhension du vivant et de leurs relations.

REFERENCES

- APG III (2009). Une mise à jour de la classification des angiospermes phylogénies Groupe pour les commandes et les familles de plantes à fleurs. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161 : 105-121.
- Barbault R., Combes Cl., Dubois A., Le Brun N. & Renaud F. (1991) *Systématique et écologie*. Edition Biosystème, Société française de systématique, Paris, 106 p.
- Boureau E. (1957). *Anatomie végétale, vol. 3*. Presses universitaires de France, Paris, 752 p.
- Bousquet J.-C. (2008). *Découverte géologique: les plus beaux sites de l'Hérault*. Les Ecologistes de l'Euzière, Prades-le-Lez, 160 p.
- Bocherens H., Drucker D., Guadelli J-L, Levêque F., Mariotti A. & Vandermeersch B. (1999). Conservation des signatures isotopiques du collagène d'os et de dents du Pléistocène supérieur (Saint-Césaire, France) : Implications pour les reconstitu-

- tions des régimes alimentaires des Néandertaliens. *Bulletin et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 21 : 289-305.
- Carlquist S. (2001). *Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood*. T.E. Timell (éd.), Springer Series in Wood Science, 448 p.
- Chabal L. (1997). *Forêts et société en Languedoc (Néolithique final, Antiquité tardive): L'anthracologie, méthode et paléoécologie*. Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, Paris, 192 p.
- Chabal L., Fabre L., Terral J.-F. & Théry-Parisot I. (1999). L'anthracologie. In : C. Bourquin-Mignot, J.-E. Brochier, L. Chabal, S. Crozat, L. Fabre, F. Guibal, P. Marinval, H. Richard, J.-F. Terral & I. Théry (eds.), *La botanique*. Errance, Paris, pp. 43-104.
- Collectif des Garrigues (2013). *Atlas des garrigues, regards croisés*. Les Ecologistes de l'Euzières, Prades-le-Lez, 357 p.
- Cremers G. (1974). Architecture de quelques lianes d'Afrique tropicale 2. *Candollea*, 29 : 57-110.
- Damesin C., Rambal S. & Joffre R. (1998). Co-occurrence of trees with different leaf habit: A functional approach on Mediterranean oaks. *Acta Oecologica*, 19 : 195-204.
- Delor E., Pastor J. & Salmon A. (2014). Analyse comparée de la croissance radiale de trois espèces de Pinaceae utilisées en restauration forestière : Etude de cas sur les abords du Lac du Salagou (Hérault, France). *Orpal Synthesis*, 7 : 81-92.
- Duvigneaud P. & Denaeyer-de Smet S. (1964). *Le Cycle des éléments biogènes dans l'écosystème forêt (forêts tempérées caducifoliées)*. Université Libre, Bruxelles, 251 p.
- Navi P. & Heger F. (2005). *Comportement thermo-hydromécanique du bois*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Genève, 295 p.
- Pons A. (1970). *Le pollen*. Coll. Que sais je ? Presses Universitaires de France, Paris, 128 p.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G. & Gauberville C. (2008). *Flore Forestière Française, guide écologique illustré. Tome 3, Région méditerranéenne*. Institut pour le Développement forestier, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Direction de l'Espace rural et de la Forêt, Ecole nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Paris, 2426 p.
- Raunkiær C. (1904). Om biologiske Typer, med Hensyn til Planternes Tilpasninger til at overleve ugunstige Aarstider. *Botanisk Tidsskrift*, 26 : 14.
- Santoni S., Faivre-Rampant P., Prado E. & Prat D. (2000). Ressources génétiques. *Cahiers Agricultures*, 9 : 27-311.
- Schweingruber F.-H. & Teufen C. (1982). *Anatomie microscopique du bois*. Wald Schnee und Landschaft, F. Flück-Wirth (ed.), Kommissionsverlag, 226 p.
- Terral J.-F. & Durand A. (2006). Bioarchaeological evidence of olive tree irrigation (*Olea europaea* L.) during the Middle Age in Southern France and North Eastern Spain. *Journal of Archeological Science*, 33 : 718-724.
- Thiébaud S. (2001) Anthracanalyse des établissements néolithiques de la région liguro-provençale. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 93 : 399-409.
- Thinon M. (1992). *L'analyse pédo-anthracologique : aspects méthodologiques et applications*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille 3, Marseille, 317 p.

ANNEXE 1.

Lexique et illustration des termes notés par un astérisque (*) dans le texte.

1. **Bois à zone poreuse** : le diamètre des pores du bois initial dépasse de plusieurs fois le diamètre du bois final.
2. **Bois à pores diffus** : les pores du bois initial et du bois final sont de même taille.
3. **Bois hétéroxylé** : bois correspondant au xylème secondaire, composé de différents éléments, essentiellement des vaisseaux et des fibres trachéides ou libriformes, assurant respectivement la conduction et le soutien.
4. **Bois homoxylé** : bois propre aux Gymnospermes, composé d'un seul type de cellules, les trachéides.
5. **Canal résinifère** : canal intercellulaire contenant de la résine, disposé axialement et radialement.
6. **Champs de croisement** : zone d'intersection des éléments verticaux et horizontaux, qui, selon la nature des parois en contact, peut présenter des ponctuations.
7. **Décroissance continue des vaisseaux** : réduction progressive du diamètre entre le bois initial et final.
8. **Différence de taille nette entre les vaisseaux** : changement de taille abrupte entre le bois initial et final.
9. **Epaississements spiralés des vaisseaux** : renforts hélicoïdaux sur la face interne de la paroi secondaire des vaisseaux.
10. **Hauteur des rayons** : nombre de rayons superposés dans la longueur ; **Largeur des rayons** : nombre de rayons superposés dans la largeur.
11. **Parenchyme tangentiel** : cellules de parenchyme présentes à proximité des vaisseaux et des fibres.
12. **Perforation scalariforme** : ouverture ronde à ovale de la paroi terminale d'un élément vasculaire, subdivisée par des barreaux.
13. **Perforation simple** : ouverture ronde à ovale résultant de la disparition de la paroi terminale d'un vaisseau.
14. **Ponctuations** : petites cavités se trouvant sur les éléments de vaisseaux, fibres et trachéides, assurant les échanges et la conduction entre les différents éléments. Souvent observable au niveau des champs de croisement.
15. **Ponctuation cupressoïde** : sur champs de croisements, le diamètre de l'orifice est de même taille que l'aréole.
16. **Ponctuation picéoïde** : sur champs de croisements, le diamètre de l'orifice est plus petit que la taille que l'aréole.
17. **Ponctuation pinoïde** : en fenêtre, occupe toute la surface du champ de croisement.
18. **Ponctuation taxodioïde** : sur champs de croisements, le diamètre de l'orifice est plus grand que la taille de l'aréole.
19. **Rayon ligneux** : constitué exclusivement de cellules de parenchyme disposées radialement et assurant la conduction horizontale.
20. **Rayon hétérogène** : cellules de rayons de formes différentes.
21. **Rayon homogène** : cellules de rayons de forme identique.
22. **Trachéide** : cellule sclérifiée et vidée de son contenu, jouant le rôle de capillaire et assurant la conduction de la sève brute.
23. **Trachéide dentée** : épaississement denté, ornant la face interne des trachéides.
24. **Vaisseau** : cellule de conduction de la sève brute, ornée de ponctuations, aux parois terminales perforées.
25. **Vaisseaux accolés en file radiale** : association de vaisseaux suivant le plan radial.
26. **Vaisseaux en flammes** : répartition radiale des pores des vaisseaux présentant l'aspect d'une flamme.

ANNEXE 2.

Clé de détermination des charbons, pour les espèces prélevées au lac du Salagou.

1a.	Bois homoxylé	2
1b.	Bois hétéroxylé	6
2a.	Canaux résinifères absents (CT)	3
2b.	Canaux résinifères présents (CT)	4
3a.	Hauteur des rayons jusqu'à 50 (CLT) ; ponctuations des champs de croisement (intersection trachéides-rayons ligneux) : cupressoïdes et taxidoïdes (CLR)	<i>Cedrus atlantica</i> pp.
3b.	Hauteur des rayons inférieure à 12 (CLT)	<i>Juniperus oxycedrus</i> <i>Juniperus phoenicea</i>
4a.	Hauteur des rayons jusqu'à 50 (CLT) ; ponctuations des champs de croisement (intersection trachéides-rayons ligneux) : cupressoïdes et taxidoïdes (CLR)	<i>Cedrus atlantica</i> pp.
4b.	Hauteur des rayons inférieure à 30 (CLT) ; ponctuations des rayons : pinoïdes (CLR)	5
5a.	Présence de trachéides dentées (CLR)	<i>Pinus halepensis</i>
5b.	Absence de trachéides dentées (CLR)	<i>Pinus pinea</i>
6a.	Disposition des vaisseaux en flammes (CT)	7
6b.	Disposition des vaisseaux jamais en flammes (CT)	10
7a.	Épaississements spiralés des parois des vaisseaux (CLT)	<i>Phillyrea latifolia</i> <i>Rhamnus alaternus</i>
7b.	Pas d'épaississements spiralés des parois des vaisseaux (CLT)	8
8a.	Décroissance continue de la taille des vaisseaux entre bois initial et bois final (CT)	<i>Quercus ilex</i>
8b.	Différence de taille nette entre les vaisseaux du bois initial et du bois final (CT)	9
9a.	Rayons unisériés (CLT)	<i>Castanea sativa</i>
9b.	Rayons unisériés et multisériés (CLT)	<i>Quercus pubescens</i>
10a.	Vaisseaux diffus (CT)	11
10b.	Vaisseaux semi-poreux à poreux (CT)	20
11a.	Rayons unisériés (CLT)	12
11b.	Rayons unisériés à multisériés (CLT)	14
12a.	Perforation scalariforme (CLR) ; rayons parfois agrégés	<i>Alnus glutinosa</i>
12b.	Perforation unique (CLR)	13
13a.	Rayons hétérogènes (CLR)	<i>Salix alba</i>
13b.	Rayons homogènes (CLR)	<i>Populus nigra</i>
14a.	Épaississements spiralés des vaisseaux (CLT)	<i>Acer campestre</i>
14b.	Pas d'épaississements spiralés des parois des vaisseaux (CLT)	15
15a.	Présence de bandes de parenchyme tangentiel (CLR, CT)	<i>Ficus carica</i>
15b.	Absence de bandes de parenchyme tangentiel (CLR, CT)	16
16a.	Vaisseaux accolés en files radiales (CT)	17
16b.	Vaisseaux isolés (CT)	19

17a. Files radiales composées de 2 à 3 vaisseaux (CT).....	<i>Laurus nobilis</i>
17b. Files radiales composées de 2 à 10 vaisseaux (CT).....	18
18a. Présence de perforations scalariformes (CTR).....	<i>Corylus avellana</i>
18b. Absence de perforations scalariformes (CTR)	<i>Olea europaea</i>
19a. Taille perforations scalariformes > 15 barreaux (CTR)	<i>Cornus sanguinea</i>
19b. Taille perforations scalariformes < 15 barreaux (CTR).....	<i>Buxus sempervirens</i>
20a. Rayons en partie unisériés (CLT).....	21
20b. Rayons uniquement multisériés (CLT)	25
21a. Rayons unisériés et bisériés (CLT).....	22
21b. Rayons unisériés et multisériés (CLT)	23
22a. Épaississements spiralés (CLT).....	<i>Pistacia terebinthus</i>
22b. Pas d'épaississement spiralé (CLT)	<i>Fraxinus angustifolia</i>
23a. Rayons de 1 à 30 cellules de large (CLT)	<i>Quercus pubescens</i>
23b. Rayons de 1 à 8 cellules de large (CLT).....	24
24a. Perforation des vaisseaux simple (CLR)	<i>Prunus dulcis</i>
24b. Perforation des vaisseaux simple et scalariforme (CLR)	<i>Arbutus unedo</i>
25a. Pas d'épaississement spiralé (CLT).....	<i>Hedera helix</i>
25b. Épaississement spiralé (CLT)	26
26a. Perforation des vaisseaux simple (CLR)	<i>Clematis flammula</i>
26b. Perforation des vaisseaux à tendance scalariforme (CLR).....	<i>Vitis vinifera</i>

TRANSPORT ET DEPOT DES MACRORESTES VEGETAUX EN ZONE HUMIDE (LAC DU SALAGOU, HERAULT)

Thomas Damestoy ¹, Djelanne Gustave ², Quentin Vautrin ³

*Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie, UMR 5059
Institut de Botanique. 163, rue A. Broussonet, 34090 Montpellier (France)*

¹ thomas.damestoy@etud.univ-montp2.fr, ² djelanne.gustave@etud.univ-montp2.fr,
³ quentin.vautrin@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Adam Ali

Citation : Damestoy T., Gustave D. & Vautrin Q. (2014). Transport et dépôt des macrorestes végétaux en zone humide (Lac du Salagou, Hérault). *Orpal Synthesis*, 7 : 69-79.

Résumé : La taphonomie est l'étude des processus de fossilisation. Notre étude s'articule autour des biais définis notamment par la sur- ou sous-représentation d'une espèce dans un assemblage fossile, par les différences de diversité spécifique entre assemblage macrofossile et flore locale, ainsi que par la dégradation des restes lors du transport. Afin de tester nos hypothèses, nous avons prélevé des macrorestes dans différents points du site constitué par le Lac Salagou et la rivière Révérygnès qui l'alimente. Les résultats montrent qu'il y a des différences de richesse spécifique et d'abondance relative entre assemblage taphonomique et flore locale. Les biais étant importants, l'étude doit être complétée par transdisciplinarité.

Mots clés : taphonomie, feuilles, référentiel, river

Abstract: *Transportation and deposition of plant macroremains in wetlands (Salagou Lake, Hérault).* Taphonomy is the study of fossilisation process. Our study focuses on possible bias, including over- or under-representation of species in fossil samples, differences in species diversity between macrofossil assemblages and local flora, and degradation of remains during transport. To test our hypotheses, we collected macroremains in several places of the Salagou Lake and in one of its tributary, the Révérygnès river. Results show differences of species richness and relative abundance between taphonomical assemblages and local vegetation. Since biases are important, the study should be completed by transdisciplinarity.

Key words: taphonomy, leaves, reference study, river

La taphonomie est l'étude des différents processus (biologiques, physico-chimiques) qui assurent la fossilisation d'un organisme et qui interviennent après sa mort jusqu'à son enfouissement définitif (De Wever et al., 2010). Elle consiste à définir les conditions de l'enfouissement. Cela permet de reconstituer les événements passés qui ont permis la fossilisation. Cette discipline se base sur des observations actuelles afin d'expliquer les différents procédés de fossilisation. Le

principe d'actualisme, qui stipule que les conditions de vie des organismes actuels étaient les mêmes dans le passé, est utilisé pour permettre la reconstitution de ces environnements.

Nous nous sommes intéressés à un lac et à une rivière, car ce sont des milieux propices au piégeage et à la conservation de macrorestes. C'est dans les sédiments déposés dans des milieux humides que les organismes sont essentiellement fossilisés (Kaal et al.,

2013). Dans les rivières, la présence de gours crée des zones d'accumulation des macrorestes qui tombent dans la rivière. Ils sont caractérisés par un changement de pente correspondant à une dépression et un ralentissement du courant. Ils forment des pièges naturels et donc des points d'étude intéressants lorsque l'on s'interroge sur les questions de taphonomie.

Sur substrat calcaire, ces gours peuvent constituer des environnements favorables à la formation de travertins. Le phénomène de travertinisation permet de piéger et de fossiliser des macrorestes végétaux, essentiellement des feuilles (Ali, 2003). Il résulte de la précipitation des carbonates dissouts dans l'eau, suite au dégazage du dioxyde de carbone dissout qui permet la saturation en carbonate de l'eau. Ces dépôts calcaires se forment dans des rivières saturées en carbonates, au niveau des cascades, des ruptures de pente, comme des gours ou des obstacles qui permettent le dégazage du CO₂ et la retenue des débris végétaux. Ces faciès travertineux contiennent de nombreux débris et constituent un registre fossile important. L'environnement qui fait l'objet de cette étude n'est pas un milieu favorable pour la formation de travertins. La composition minérale des eaux du lac et de la rivière, étant pauvres en carbonates, ne permet pas cela, malgré la présence de gours dans la rivière. Les gours serviront cependant de proxy pour étudier les phénomènes taphonomiques dans les travertins.

Cette étude a été réalisée sur le site du lac du Salagou et un des cours d'eau qui l'alimentent, la rivière Révérygnes. Elle s'articule autour de 2 questions : retrouve-t-on dans les assemblages de macrorestes les mêmes espèces présentes aux alentours ? Des espèces végétales non présentes sur les berges du lac ou de la rivière peuvent-elles produire des macrorestes que l'on retrouvera dans les assemblages ?

MATERIEL ET METHODES

1- Site d'étude

Créé en 1969, le lac du Salagou est un lac artificiel d'une superficie de 750 ha, à proximité de la commune de Clermont-l'Hérault, dans le département de l'Hérault. La couleur rouge des alentours du lac est due aux ruffes, dépôts typiques des régions arides et chaudes riches en oxyde de fer. Ces ruffes datent du Permien (-250 Ma) et sont contemporaines de l'érosion de la chaîne hercynienne. Les dépôts se sont accumulés dans les plaines alluviales de la région. Des couches sédimentaires calcaires se sont aussi déposées sur le site du lac du Salagou lors de la montée des eaux marines pendant le Jurassique. Ces roches ont ensuite été déformées lors de l'orogénèse pyrénéenne. Un événement volcanique au Pléistocène a entraîné la formation de cheminées de basaltes aux abords du lac.

2- Échantillonnages et prélèvements

Pendant deux jours, des repérages et des prélèvements ont été réalisés sur les berges du lac. Plusieurs lieux de prélèvement ont été choisis sur la base des critères suivants : couvert végétal proche de la berge, facilité d'accès et d'échantillonnage, présence de structures permettant la capture et l'accumulation des macrorestes (gours, courant faible dans un bras mort). Le repérage des lieux favorables à l'échantillonnage nous a permis de sélectionner deux zones de prélèvement.

La première zone d'étude est située en bordure du lac et correspond à un bras mort (Fig. 1). Le courant y est faible. La berge forme un arc de cercle, et est occupée par une roselière dominée par des roseaux (*Phragmites australis*). Les eaux abritent un herbier d'une espèce introduite d'Amérique du Sud (*Lagarosiphon major*). Dans le but de répertorier les espèces végétales de la zone, cette dernière a été divisée en 20 sous-zones de 4 m de large. Dans chacune de ces sous-zones, les espèces végétales ont été répertoriées et leurs distances par rapport à la

berge ont été relevées et rassemblées dans un tableau.

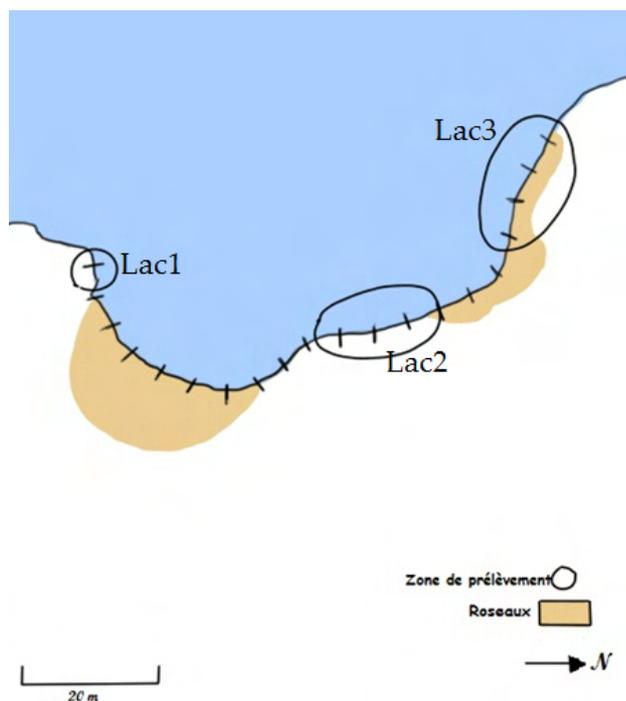


Figure 1. Cartographie de la zone de prélèvement du lac

Nous avons ensuite prélevé les macrorestes en 3 points différents. Le point Lac1 situé dans les eaux des sous-zones 1 à 2, le point Lac2 dans celles des sous-zones 9 à 14, et le point Lac3 dans les sous-zones 17 à 20 (Fig. 1). Lac1 représente un lieu de prélèvement en amont d'une forte concentration de roseaux, Lac2 représente un lieu de prélèvement entre deux roselières, et Lac3 est un lieu de prélèvement au niveau d'une des roselières. Les macrorestes flottant sur le lac ont été récupérés à la main, puis un tamisage du sédiment a été réalisé afin de récupérer les macrorestes qui s'y trouvaient. Ceci a été fait à l'aide d'une pelle et de deux tamis de calibres différents (2 et 1 mm).

La deuxième zone d'échantillonnage correspond à une rivière alimentant le lac, la rivière Réverignes, située à l'ouest du lac. Sur cette rivière deux gours ont été choisis comme lieux d'échantillonnage des macrorestes. Les deux gours sont appelés Gours1 et Gours2 (Annexe 1). Les espèces végétales se trouvant

sur les berges aux alentours des gours ont été répertoriées. La distance entre le gour et l'espèce végétale identifiée a été relevée. Les macrorestes accumulés dans ces gours ont été récupérés à la main. Le tamisage de la zone n'a pas été réalisé, car le sédiment était trop fin et le fond de la rivière principalement de nature rocheuse.

Les coordonnées GPS des deux zones étudiées sont N 43°39'11.1018'' ; E 03°20'05.3334'' pour le lac et N 43°39'07.3008'' ; E 03°19'24.549'' pour les 2 gours.

3- Analyse de données

Les espèces prélevées sur les différents points d'échantillonnage ont été séchées, puis identifiées avec l'aide de notre tuteur. La nomenclature botanique a été vérifiée dans Tela Botanica (<http://www.tela-botanica.org>). Cela a permis de réaliser une étude quantitative et qualitative pour dresser un portrait cohérent de la diversité spécifique des assemblages de macrorestes prélevés dans chacun des lieux d'échantillonnage. Le roseau, qui aurait créé un biais dans l'étude de la richesse spécifique, n'a pas été comptabilisé dans l'étude quantitative des points Lac2 et Lac3.

Pour chaque lieu d'échantillonnage, une courbe de raréfaction a été tracée. Cette approche permet d'évaluer si l'effort d'échantillonnage est suffisant pour collecter toutes les espèces présentes dans l'assemblage macrofossile (Bechte et al., 2013). Nous avons répliqué ces courbes 4 fois pour chaque lieu d'échantillonnage (Annexe 2) afin d'obtenir une courbe de raréfaction moyenne. Une courbe moyenne plus précise aurait été obtenue en reproduisant ces courbes plusieurs centaines de fois. Avec le temps qui nous était imparti, nous avons dû réduire ce nombre, et nous nous sommes limités à 4 courbes afin d'avoir une idée de la tendance des courbes moyennes.

En complément des courbes de raréfaction, des boîtes de Tukey ont été construites à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2005) pour représenter la distribution

des valeurs récoltées lors des tests. Deux boîtes de Tukey ont été construites : la première pour indiquer la distribution des tirages lors des tests de raréfaction dans des assemblages de macrorestes ayant une diversité spécifique faible (5 espèces), et la seconde pour indiquer la distribution des valeurs récoltées lors des tirages aléatoires des tests de raréfaction dans des assemblages ayant des diversités spécifiques de 10 espèces. Les valeurs médianes données par les boîtes de Tukey doivent permettre de compléter les données issues des tests de raréfaction en indiquant le nombre minimum de macrorestes à prélever afin d'avoir une estimation fiable de la richesse spécifique du point de prélèvement.

RESULTATS

1- Répartition des espèces végétales sur les berges et dans les assemblages.

La **Table 1** donne la répartition spatiale des espèces végétales présentes dans les sous-zones des berges du lac et de la rivière. La **Table 2** montre des disparités de diversité spécifique entre les assemblages de macrorestes et les berges. Certaines espèces présentes sur les berges sont absentes de l'échantillonnage, comme par exemple l'églantier (*Rosa canina*) ou l'orme (*Ulmus minor*) pour le lac et la salsepareille (*Smilax aspera*) ou le laurier-tin (*Viburnum tinus*) pour les gours. Au total, 50 % des espèces identifiées sur les berges du lac ne se retrouvent pas dans les assemblages de macrorestes, et 36 % des espèces identifiées sur les berges de la rivière sont absentes des assemblages des gours. Inversement, certaines espèces retrouvées dans les assemblages, comme le chêne vert (*Quercus ilex*) ou le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), n'ont pas été observées sur les berges.

2- Types et natures de macrorestes

On distingue plusieurs types de macrorestes dans les échantillons : les feuilles, les strobiles et chatons d'aulne (*Alnus glutinosa*), les fruits de frêne (*Fraxinus angustifolia*) et des bourgeons d'espèces non identifiées. La

proportion des types de macrorestes varie d'un lieu de prélèvement à un autre. On retrouve en grande majorité des feuilles dans les lieux de prélèvement du lac, alors que l'on retrouve beaucoup de strobiles, de chatons et de fruits, en plus du grand nombre de feuilles dans les gours. Les gours présentent des macrorestes généralement abîmés et fragmentés, tandis qu'ils sont le plus souvent entiers dans le lac, ce qui peut renseigner sur les différents types de transport. La texture des macrorestes est également différente suivant les espèces : certaines espèces ont des feuilles plus coriaces que d'autres, comme par exemple le chêne vert (*Quercus ilex*) ou le laurier sauce (*Laurus nobilis*). Ceci peut avoir une influence sur la préservation des macrorestes dans les zones d'échantillonnage.

3- Richesses et diversités spécifiques

La **Figure 2** montre que la composition des assemblages de macrorestes varie d'un lieu de prélèvement à l'autre. Les assemblages des gours ont une richesse spécifique forte (10 espèces) et une abondance relative élevée (près de 500 macrorestes récoltés pour chacun des gours). Les assemblages issus des lieux de prélèvement Lac1 et Lac3 présentent une richesse spécifique faible (seulement 6 et 5 espèces trouvées, respectivement) et une abondance relative faible (ordre de la centaine de macrorestes prélevés). L'assemblage de Lac2 possède une richesse spécifique et une abondance relative plus proche de celles des assemblages des gours que de celles des autres points du lac.

En outre, la **Figure 2** montre que dans le lac, il y a prédominance d'une seule espèce (excluant le roseau), qui est différente en fonction du point du lac. Le peuplier (*Populus nigra*) est l'espèce la plus abondante à Lac1 et Lac3, alors que le saule (*Salix alba*) qui est majoritaire à Lac2. Dans les gours, il y a aussi une légère prédominance de macrorestes issus d'une seule espèce, l'aulne (*Alnus glutinosa*). Ces espèces prédominantes sont les plus proches de la berge au niveau du point d'échantillonnage. Les espèces les plus abondantes dans les assemblages sont caducifoliées.

Table 1. Distances (en m) entre les espèces présentes sur la berge et le lac ou la rivière

Ag, *Alnus glutinosa* ; Bs, *Buxus sempervirens* ; Cf, *Clematis flammula* ; Fa, *Fraxinus angustifolia* ; Hf, *Helleborus foetidus* ; Hh, *Hedera helix* ; Jc, *Juniperus communis* ; Ln, *Laurus nobilis* ; Pa, *Phragmites australis* ; Pn, *Populus nigra* ; Ra, *Rhamnus alaternus* ; Rc, *Rosa canina* ; Ru, *Rubus ulmifolius* ; Rua, *Ruscus aculeatus* ; Sa, *Salix alba* ; Sma, *Smilax aspera* ; St, *Salix triandra* ; Um, *Ulmus minor* ; Vt, *Viburnum tinus*.

Zone	Point	Esp.1	Esp.2	Esp.3	Esp.4	Esp.5	Esp.6	Esp.7	Esp.8	Esp.9
Lac1	1	Pn 5,2	Pn 7,8							
	2	Pn 9,9	Fa 13,5	Bs 17,4	Bs 21,6					
	3	Pa <1,0	Pn 9,1	Pn 13,5	Fa 14,5					
	4	Pa 3,5	Pa 9,6	Pn 9,6	Fa 12,1	Rc 15,2	Fa 15,2			
	5	Pa <1,0	Pn 8,1	Rc 10,8	Pn 12,5					
	6	Pa 2,3	Pn 6,2	Pa 6,2	Pn 10,8	Pa 10,8				
	7	Pa 0,5	Pn 6,6	Ra 12,5	Fa 12,5	Jc 12,5				
	8	Pa 0,5	Fa 12,3	Ra 12,3						
Lac2	9	Pn 6,0	Fa 7,0	Rc 11,8	Fa 12,6	Rc 14,9	Fa 14,9	Ra 18,8	Bs 27,4	
	10	Ra 13,5								
	11	Sa 1,0	Pn 7,5							
	12	Sa 8,9	Fa 11,4	Fa 17,8						
	13	Rc 10,7	Cf 10,7	Fa 13,2	Rc 13,2	Fa 16,2	Rc 16,2	Cf 16,2		
	14	Pa 2,2	Rc 9,7	Fa 9,7	Fa 13,5	Rc 13,5	Cf 13,5	Um 13,5	Uh 15,5	Fa 15,5
Lac3	15	Pa 1,7	Um 8,5	Um 11,7	Um 14,3	Fa 14,3	Rc 14,8	Ra 14,8		
	16	Pa 2,7	Fa 8,6	Fa 10,6	Um 10,6	Rc 14,7	Fa 14,7			
	17	Pa <1,0	Fa 8,3							
	18	Pa 1,0	Fa 5,2	Fa 8,0						
	19	Pa <1,0	Fa 5,3	Fa 7,0	Fa 10,4					
	20	Pa 1,3	Fa 11,1							
Gour1	G1	Ag <1,0	Hh <1,0	Fa <1,0	Ru <1,0	Ln 4,8	Sma 5,7	Rua 5,7	Pn 5,7	Ra 10,7
Gour2	G2	St <1,0	Ru <1,0	Hh <1,0	Fa <1,0	Rua <1,0	Hf <1,0	Pn 3,9	Ra 8,4	Vt 9,5

Table 2. Espèces trouvées dans la végétation des berges et dans les assemblages de macrorestes

	Berge lac	Berge riv.	Lac1	Lac2	Lac3	Gour1	Gour2	Berges + Lac	Berges + Gours
<i>Acer monspessulanum</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Alnus glutinosa</i>	0	1	0	1	0	1	1	0	1
<i>Buxus sempervirens</i>	1	0	1	0	0	0	1	1	0
<i>Clematis flammula</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Fraxinus angustifolia</i>	1	1	0	1	0	1	1	1	1
<i>Hedera helix</i>	0	1	0	0	0	1	1	0	1
<i>Helleborus foetidus</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Juniperus communis</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Laurus nobilis</i>	0	1	0	0	0	1	1	0	1
<i>Phragmites australis</i>	1	0	1	1	1	0	0	1	0
<i>Populus nigra</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Quercus ilex</i>	0	0	0	1	1	1	0	0	0
<i>Quercus pubescens</i>	0	0	1	1	1	1	1	0	0
<i>Rhamnus alaternus</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Rosa canina</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Salix alba</i>	1	0	1	1	1	0	0	1	0
<i>Salix triandra</i>	0	1	0	0	0	1	1	0	1
<i>Ulmus minor</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Rubus ulmifolius</i>	0	1	0	0	0	0	1	0	1
<i>Ruscus aculeatus</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Smilax aspera</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Viburnum tinus</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Indéterminé 1	/	/	0	1	0	1	0	/	/
Indéterminé 2	/	/	0	1	0	1	0	/	/
Indéterminé 3	/	/	0	1	0	0	0	/	/
Total	10	11	6	10	5	10	9	5	7

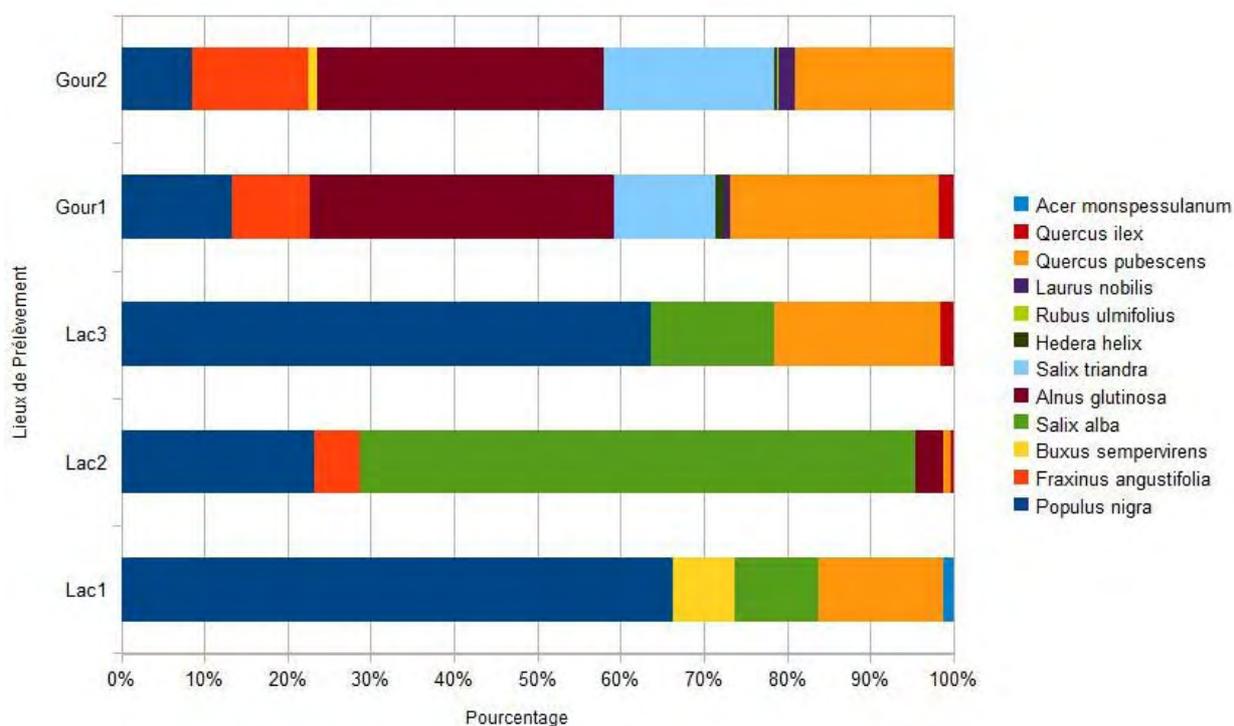


Figure 2. Richesse spécifique et abondance relative des assemblages de macrorestes

4- Courbes de raréfaction et boîtes de Tukey

La **Figure 3** représente les courbes de raréfaction. Lorsqu'une courbe atteint son asymptote, elle donne l'effort d'échantillonnage à réaliser pour prélever au moins un macroreste de toutes les espèces présentes dans l'assemblage. D'après les courbes, pour récolter toutes les espèces des assemblages

des Gour1, Gour2 et Lac2, il faut échantillonner de 300 à 500 macrorestes. Pour les points Lac1 et Lac3, la récolte de 60-70 macrorestes est nécessaire pour échantillonner toutes les espèces.

Les médianes de 36,5 et 304,0 de la **Figure 4** donnent le nombre de macrorestes minimum à tirer au hasard pour trouver respectivement 5 et 10 espèces différentes.

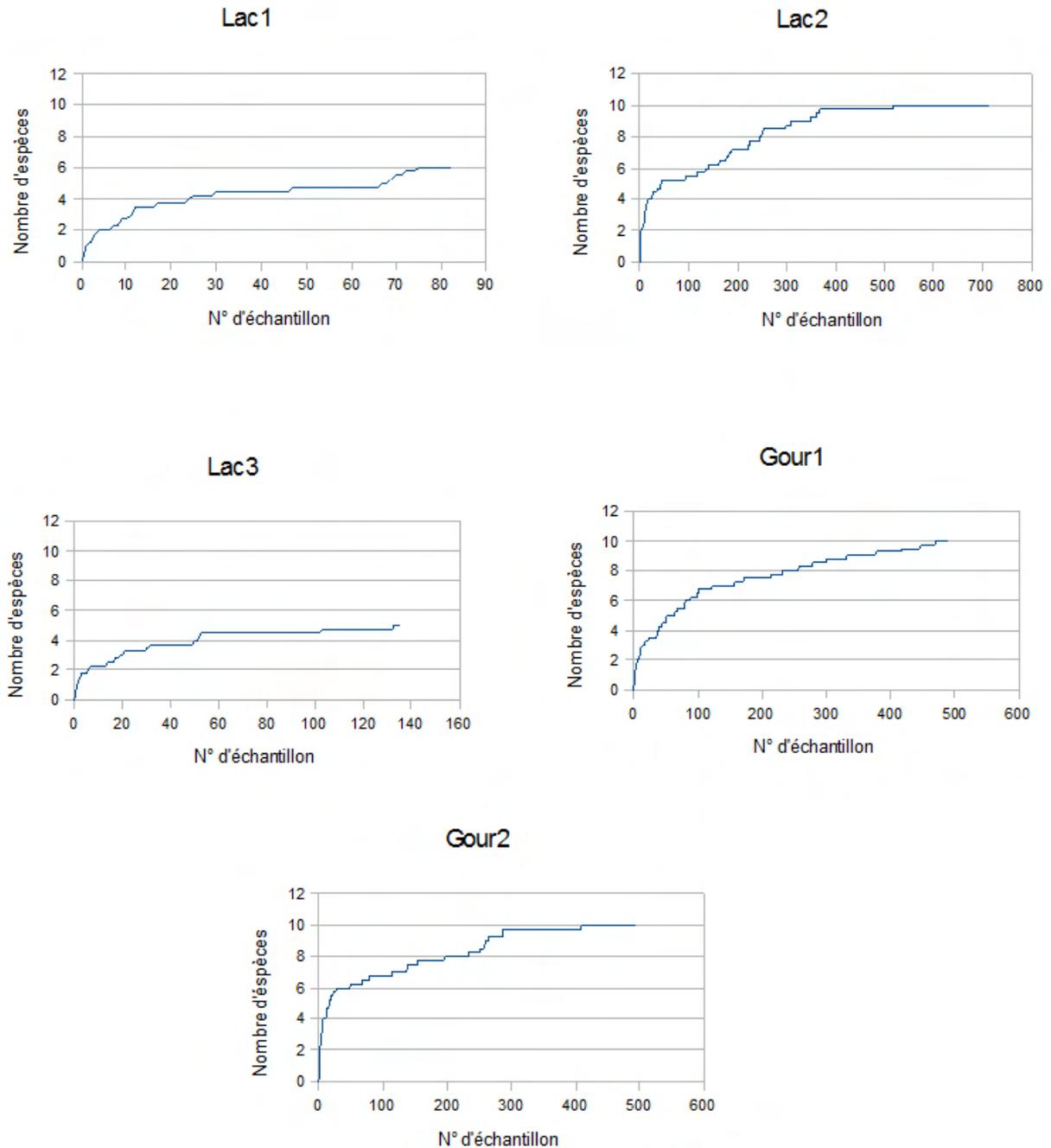
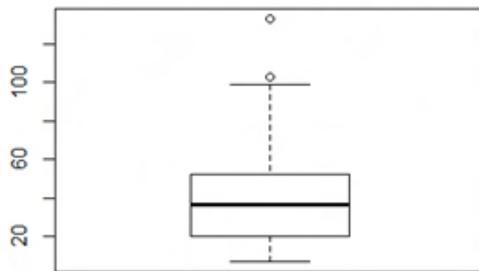


Figure 3. Courbes de raréfaction des assemblages de macrorestes

Distribution du nombre d'échantillons à tirer pour obtenir 5 espèces



Distribution du nombre d'échantillons à tirer pour obtenir 10 espèces

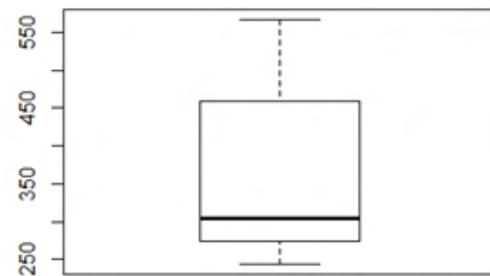


Figure 4. Distribution des tirages lors de la réalisation des courbes de raréfaction

DISCUSSION

1- Piégeage et accumulation

Les gours représentent un relief favorable à la formation de travertins. Ceux-ci forment des dépôts calcaires renfermant des macrorestes végétaux (Ali, 2003). L'abondance des débris végétaux récoltés dans le Gour1 et Gour2 montre que ces derniers représentent des faciès propices à l'accumulation des macrorestes. Les algues et les bio-films sécrétés par des cyanobactéries capturent les macrorestes (Freytet et al., 1996 ; Rossi, 1983). L'abondance de *Lagarosiphon major* dans le lac est susceptible de favoriser cette accumulation. De plus, il est probable que la quantité importante de macrorestes de roseau flottant à la surface pourrait agir de la même façon.

L'abondance des macrorestes au niveau de Lac2, localisé entre les deux roselières, peut être expliquée par ce phénomène. Les roselières agiraient comme des pièges à macrorestes. Les débris végétaux portés par les courants seraient retenus par les cannes flottantes puis sédimenteraient. Ce phénomène pourrait expliquer la répartition du nombre de macrorestes dans Lac1, Lac2 et Lac3. Les courants allant d'ouest en est rencontrent la première roselière, y laissent les macrorestes qu'ils transportent et qui sédimentent au niveau de Lac2.

Lac3, situé sur une roselière, possède moins de restes que Lac2, car la majorité des restes a déjà été piégée par la première concentration de roseaux (Fig. 1). Les milieux lacustres et

les tourbes peuvent être utilisés comme des archives naturelles pour la recherche paléocologique (Kaal et al., 2013). Une configuration comme celle de la première zone de prélèvement peut aider à cette bioaccumulation.

2- Transport, richesse spécifique et représentativité

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une disparité entre les espèces que l'on retrouve dans les assemblages et les espèces de la berge. La plupart des espèces à feuillage sempervirent ou produisant peu de feuilles sont absentes des assemblages de macrorestes, comme le nerprun alaterné (*Rhamnus alaternus*) par exemple. Par contre, les espèces à feuillage caduc ou produisant beaucoup de fruits sont surreprésentées. Cette surreprésentation se reflète dans l'abondance relative des macrorestes. Les macrorestes d'espèces sempervirentes sont sous-représentés, voir absents, par rapport à ceux des espèces caducifoliées. L'étude des macrorestes n'est donc pas suffisante pour dresser la liste des espèces sempervirentes au niveau local (berges du lac ou de la rivière).

De plus, certaines espèces caducifoliées qui produisent un grand nombre de macrorestes n'ont pas été retrouvées dans les assemblages (par exemple *Ulmus minor*). On retrouve aussi des espèces ne faisant pas partie de la végétation locale (par exemple, *Quercus pubescens*). Sur les berges du lac, 2 individus de saule (*Salix alba*) et 5 de nerprun alaterné (*Rhamnus alaternus*) sont présents, mais 501

macrorestes de saules ont été comptabilisés, tandis qu'aucun de nerprun alaterne n'apparaît. Ces observations montrent que l'étude seule des macrorestes végétaux ne permet pas de dresser la liste exhaustive des espèces locales. Elles sont cependant à nuancer : on remarque qu'en multipliant les points d'échantillonnage, nous parvenons à dresser une liste plus précise des espèces locales et à déterminer l'abondance relative de ces dernières. Nous pouvons en déduire que l'échantillonnage sur un seul point favorise l'émergence de prélèvements de faible diversité avec prédominance d'une espèce qui, sur la berge, produit d'abondants macrorestes qui saturent certaines zones du site et éclipsent les autres espèces. En multipliant les points d'échantillonnage, on estompe les biais de représentation. Cela permet de réduire les disparités du nombre de macrorestes entre les assemblages et la diversité, qui peuvent résulter du transport par l'eau.

La présence d'espèces non locales dans les assemblages peut s'expliquer grâce au transport. Les macrorestes végétaux peuvent être transportés de deux façons principales, par le vent et/ou par l'eau (Mancuso, 2009). On peut déterminer en partie le type de transport en étudiant l'état des feuilles. Des bords droits et angulaires avec de nombreuses parties abîmées dans le limbe sont les signes de dommages mécaniques dus au transport par l'eau (Mancuso, 2009). Ces observations peuvent être complétées par une analyse de la granulométrie. La présence de pélites ou autre sédiment composé de grains de taille inférieur à 250 µm est la résultante d'un courant faible et lent, alors que la présence de conglomérats ou de brèches est la résultante d'un courant fort (Bravard, 1983). Toutefois, on peut noter que les feuilles les plus coriaces comme celles du chêne vert ou du laurier sont moins abîmées et sont quasiment intactes : la cuticule et la texture de ces feuilles permettent de les retrouver intactes même après un transport. Quant aux feuilles plus fragiles, comme celles de l'aulne ou du peuplier, elles sont systématiquement l'objet de dommages caractérisés selon la puissance du cours d'eau.

Le fait que les feuilles de chêne pubescent soient retrouvées quasiment entières peut être attribué à un transport principalement éolien (Mancuso, 2009). Le ruissellement sur le sol aurait fractionné et abîmé les feuilles. De plus, le chêne pubescent est une espèce dont les feuilles sont marcescentes, c'est à dire qu'il conserve ses feuilles mortes sur les branches durant l'hiver. Les feuilles ne tombent que lorsque de nouvelles repoussent (pendant le printemps). On peut supposer que de grandes rafales de vent aient pu détacher les feuilles et les transporter jusqu'au lac.

3- Effort d'échantillonnage

Les tests de raréfaction corrélés avec les boîtes de Tukey renseignent sur les biais inhérents à la taphonomie. Ils montrent qu'il est nécessaire de récolter un nombre minimum de macrorestes pour être sûr d'échantillonner toutes les espèces présentes dans les assemblages. Ce nombre minimum varie par rapport au type de végétation environnante. Ici il faut prélever 300 échantillons pour potentiellement enregistrer les 10 espèces présentes dans l'assemblage. Dans le cas où le nombre de macrorestes récoltables est inférieur à ce seuil, il faut multiplier les prélèvements aux alentours pour être sûr de ne pas sous-estimer la richesse spécifique globale. Des tests statistiques spécifiques ont besoin d'être élaborés pour comparer la différence de richesses entre les différentes communautés (Rossi, 1983) ou entre les points de prélèvement.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que les restes végétaux accumulés en bordure d'un lac ou dans les gours d'une rivière ne reflètent pas parfaitement la végétation environnante. L'étude des macrorestes ne permet pas de dresser une liste complète des espèces végétales présentes sur les berges. Certaines espèces étaient absentes de nos assemblages, notamment les espèces sempervirentes, tandis que l'on en retrouvait d'autres, pourtant absentes de la végétation locale.

Une étude palynologique complémentaire permettrait de préciser et d'étendre la liste des espèces présentes sur la berge. La présence de pollen d'espèces produisant peu de macrorestes (tel le nerprun alaterne ou l'orme champêtre) rendrait mieux compte de la véritable diversité végétale locale.

L'étude taphonomique des macrorestes comporte de nombreux biais. L'abondance des espèces végétales ne peut être définie, car il y a des distorsions de la représentativité entre espèces caducifoliées et sempervirentes. De même, certaines espèces caducifoliées sont surreprésentées dans certains assemblages. Trouver beaucoup de fossiles d'aulne ne signifie pas que l'on se trouve dans une aulnaie, et trouver quelques macrorestes de chêne vert ne veut pas dire qu'un seul individu était présent. Ces distorsions peuvent être estompées en réalisant plusieurs points d'échantillonnage qui rendent mieux compte de la diversité et de l'abondance relative en s'affranchissant des surreprésentations locales.

La représentativité peut être également biaisée avec la texture des macrorestes. En effet, une feuille plus coriace sera mieux conservée lors du transport et aura donc plus de chances de se fossiliser qu'une feuille souple. Un transport des macrorestes sur une longue distance, notamment par ruissellement, est susceptible de fragmenter les échantillons et de diminuer la probabilité pour ces derniers d'arriver dans la zone de fossilisation et de se fossiliser. Le transport éolien vers le lac ou la rivière dégrade moins les feuilles transportées. Le type de transport peut donc être en partie défini grâce à la fragmentation plus ou moins importante des échantillons. Des fossiles de feuilles très fragmentées tendraient à montrer qu'il y a eu un transport par l'eau. Des fossiles de feuilles entières suggèrent qu'il y a eu un transport par le vent, par une eau calme ou aucun transport (Mancuso, 2009). Cette problématique autour de la fragmentation des macrorestes peut être complétée en comparant les assemblages avec la granulométrie des sédiments : un sédiment fin et des feuilles entières témoigneraient d'un courant faible. Des feuilles abîmées et un

sédiment plus grossier témoigneraient plutôt d'un courant d'eau plus fort. Afin de réaliser une représentation exacte de la végétation passée d'un milieu lacustre, il faudrait compléter notre étude par plusieurs autres expériences : une comparaison des relevés granulométriques des sites, ainsi qu'une analyse des microrestes retrouvés dans les sédiments du lac et des prélèvements dans d'autres points du lac.

REFERENCES

- Ali A.A. (2003). *Les systèmes travertineux holocènes et caractérisation des paléopaysages méditerranéens et subalpins (France) : une approche géobotanique séquentielle à haute résolution spatiale*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, 140 p.
- Bravard J.-P. (1983). Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de Géographie Alpine*, 71 : 363-379.
- Bechtel D., Fettes T., Larue M. & Urbaniak O. (2013). La formation travertineuse des grandes aigüères : témoin des variations récentes de végétation du Gard. *Orpal Synthesis*, 6 : 7-15.
- De Wever P., David B., Neraudeau D. & Broutin J. (2010). *Paléobiosphère, regards croisés des sciences de la vie et de la terre*. Muséum National d'Histoire Naturelle, Société Géologique de France, Paris, 796 p.
- Freytet P., Kerp H. & Broutin J. (1996). Permian freshwater stromatolites associated with the conifer shoots *Cassinisia orobica* Kerp et al. – a very peculiar type of fossilization. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91 : 85-105.
- Kaal J., Criado-Boado M., Lopez-Saez J.-A., Lopez-Merino L., Mighall T., Carrione Y., Silva Sanchez N. & Martinez Cortiza A. (2013). Prehistoric land use at an archaeological hot-spot (the rock art park of Campo Lameiro, NW Spain) inferred from charcoal, synanthropic pollen and non-pollen palynomorph proxies. *Journal of Archaeological Science*, 40 : 1518-1527.

Mancuso A.C. (2009). Taphonomic analysis in lacustrine environments : Two different contexts for Triassic lake paleofloras from Western Gondwana (Argentina). *Sedimentary Geology*, 222 : 149-159.

R Development Core Team (2005). *R: A language and environment for statistical*

computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Rossi J.-P. (2011). Rich : An R Package to Analyse Species Richness. *Diversity*, 3 : 112-120.

ANALYSE COMPAREE DE LA CROISSANCE RADIALE DE TROIS ESPECES DE PINACEAE UTILISEES EN RESTAURATION FORESTIERE : ETUDE DE CAS SUR LES ABORDS DU LAC DU SALAGOU (HERAULT, FRANCE)

Étienne Delor ¹, Julie Pastor ², Alice Salmon ³

Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie, UMR 5059
Institut de Botanique. 163, rue A. Broussonet, 34090 Montpellier (France)

¹ etienne.delor@etud.univ-montp2.fr, ² julie.pastor@etud.univ-montp2.fr,

³ alice.salmon@etud.univ-montp2.fr

Encadrement : Benoît Brossier

Citation : Delor E., Pastor J. & Salmon A. (2014). Analyse comparée de la croissance radiale de trois espèces de Pinaceae utilisées en restauration forestière : Etude de cas sur les abords du Lac du Salagou (Hérault, France). *Orpal Synthesis*, 7 : 81-92.

Résumé : Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), le pin pignon (*Pinus pinea* L.) et le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Carr.) sont utilisés en restauration forestière autour du lac Salagou. L'étude dendrométrique, s'appuyant sur les données climatologiques de ces 30 dernières années selon une approche statistique, vise à comprendre et à confronter la variabilité d'accroissement de chacune de ces espèces. Les variations de température et de pluviométrie semblent avoir un impact significatif. Chaque espèce, en fonction de son écologie, ne réagit pas de la même manière. Le pin pignon et le pin d'Alep semblent les mieux adaptés au milieu considéré.

Mots clés : dendrochronologie, cerne de croissance, climatologie, plantation

Abstract: Comparison of the radial growth of three Pinaceae species used in forest restoration: Case study from the Salagou lake vicinity (Hérault, France). The Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.), the pinion pine (*Pinus pinea* L.) and the Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Carr.) are used in forest restoration around the Salagou lake. The dendrometric study based on climatological data of the past 30 years, with a statistic approach, aims at understanding and comparing the variability of the radial growth of each of these species. Variations in temperature and precipitation seem to have a significant impact. Each species, depending on its ecological requirements, responds in different ways to these variations. The pinion pine and the Aleppo pine seem to be the best adapted species to the considered environment.

Key words: dendrochronology, growth ring, climatology, plantation

L'étude dendroclimatique met en relation le climat et les informations contenues dans les cernes des arbres. Cette méthode développée au début du 20^{ème} siècle par A.E. Douglas, E. Schulman, et plus récemment F.H.

Schweingruber (Lebourgeois & Merian, 2012), est importante pour reconstruire et analyser la variabilité des climats présents et passés. Elle permet de comprendre le comportement des arbres face aux changements globaux annoncés par le GIEC

(2002). Cook (1987) explique dans une étude que généralement, durant leur période de croissance, les arbres produisent chaque année un cerne dont la largeur dépend des conditions environnementales et des processus physiologiques qui les entourent. Cette production intègre alors des indices des facteurs environnementaux à chaque moment de mise en place de cerne, mais également durant la période de dormance où les réserves hydriques dans le sol peuvent avoir une influence sur le débourrement de l'arbre. Un cerne se compose de deux parties. Une première partie claire (le bois initial), mise en place au printemps, comprend des trachéides de grandes dimensions à parois minces favorisant la montée de sève en saison printanière. Une seconde partie plus foncée (le bois final) mise en place au cours de l'été, comprend des trachéides plus petites à parois épaisses, ayant un rôle de soutien pour l'arbre. L'arbre ralentit sa croissance en automne, la stoppe en hiver, période où il se met en "dormance" (Rensing & Samuels, 2003). La croissance des arbres étant fortement corrélée aux variations climatiques (Becker, 1989 ; Merian & Lebourgeois, 2011), il est possible de déduire le climat passé à partir de l'épaisseur des cernes ou inversement.

L'étude présentée a été effectuée sur le site du lac du Salagou, un milieu ayant subi de nombreuses modifications : mise en place d'un barrage et de plantations, et aléas météorologiques qui ont contribué à modifier la dynamique des versants en provoquant entre autres, des phénomènes d'érosion, de ruissellement et d'assèchement. Après la construction du barrage, afin de protéger les versants de l'érosion et des glissements de terrain, des plantations ont été nécessaires dans les zones les plus exposées : les coteaux à forte pente et les formations meubles, comme les pélites rouges, appelées ruffes dans la région (Auzet & Lilin, 1989). D'après Toth (1980), les espèces de résineux les plus utilisées dans les reboisements depuis les années 1960 sont présentes naturellement sur le pourtour méditerranéen : le cèdre de l'Atlas, le pin pignon et le pin d'Alep, choisis aussi pour la facilité à se procurer leurs semences, pour l'ombre qu'ils procurent et

leur rapidité de croissance. Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) pousse jusqu'à une altitude de 1600 m (Rameau et al., 2008), avec une préférence pour les sols plutôt secs, calcaires ou argilo-calcaires. C'est une essence de lumière qui peut supporter de longues périodes à forts éclaircissements et de longues périodes de sécheresse (El Khorchani et al., 2007). Le pin pignon (*Pinus pinea* L.) pousse, en France, jusqu'à 600 m d'altitude, avec une préférence pour les sols légers (limoneux-sableux). Il est indifférent au substrat et peut se trouver sur les sols siliceux et calcaires (Lehout, 2008). Il a besoin de lumière pour pouvoir se développer correctement. Bien qu'il puisse résister aux sécheresses estivales, il a une moins bonne résistance aux sécheresses répétées que le pin d'Alep. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Carr.) est endémique d'Afrique du nord (Algérie, Maroc). Il se développe bien entre 1500 et 2300 m. Sensible à la sécheresse, il préfère les versants nord et ouest, et des milieux arrosés aux températures modérées. Il prospère donc surtout en climat méditerranéen humide et froid. Boudy (1952) montre qu'il est, par contre, indifférent à la composition chimique du sol et qu'il a une prédilection pour les sols meubles et caillouteux (calcaire caillouteux, basalte et grès).

L'étude tentera d'observer les variations interannuelles des cernes, espèce par espèce, afin de faire une approche comparée pour comprendre comment les trois espèces de Pinaceae, aux exigences écologiques différentes, réagissent aux variations climatiques de la région du lac du Salagou. Dans un contexte général de réchauffement climatique, cette étude pourrait permettre de comprendre les possibles changements écologiques que pourraient subir les trois espèces vis-à-vis des prédictions du GIEC (2008).

MATERIEL ET METHODES

1- Site de prélèvement et préparation des échantillons

Le site d'étude est localisé à la Sure (43°39'11.4"N : 3°20'37.3"E), au bord du lac du Salagou (Annexe 1). Le lac se situe à

140 m d'altitude. Il est entouré de plateaux et de monts s'élevant à environ 300 m d'altitude et de plusieurs sommets allant jusqu'à 407 m (le Carels). Cette colline a été choisie pour l'étude car elle est essentiellement couverte de conifères avec, comme essences dominantes, le pin d'Alep, le pin pignon et le cèdre de l'Atlas soumis aux mêmes contraintes environnementales et climatiques. Elle contient aussi les plus vieux arbres de la zone, et le peuplement se situe à moins de 500 m des berges du lac. Il existe également des matorrals, en expansion en raison de la déprise agricole. Cette végétation est installée au sommet sur un sol neutre (pH 7), issu de roches volcaniques et de cendres (coulée de lave datée de 1,9 à 1,4 Ma), et sur le reste de la pente (de 200 à 300 m) sur un sol également neutre, mais composé de grès rouge sous forme de ruffes (carte géologique de Lodève n°989, 1/50 000, BRGM, 2008). Ils sont caractérisés par la présence d'oxyde de fer (conférant à la terre sa couleur rouge). Le site d'étude est soumis à un climat de type méditerranéen qui se caractérise par des saisons contrastées, notamment des étés chauds et secs, des hivers marqués mais doux (rarement en dessous de 0°C) et des automnes souvent soumis à des épisodes de fortes pluies (Joly et al., 2010).

Des prélèvements dendrologiques ont été effectués à l'aide d'une tarière de Pressler, sur 54 arbres (14 pins d'Alep, 14 pins pignon et 14 cèdres de l'Atlas, ainsi que 10 cèdres de l'Atlas morts et 2 pins d'Alep morts), sur les versants Sud-Sud Est et Sud-Sud Ouest, entre 200 et 310 m d'altitude. Sur chaque individu, deux carottes ont été prélevées afin de mesurer la croissance moyenne de l'arbre, d'éviter de comptabiliser de faux cernes et de repérer la présence de cernes incomplets ou manquants. Les carottes obtenues ont été séchées pendant deux semaines, puis collées au pistolet à colle sur des supports en bois de telle sorte que le centre de l'échantillon soit orienté vers l'extérieur. Le ponçage a été effectué en utilisant trois grains de papiers à poncer successifs (240, 400 et 600 grains/cm²), afin d'améliorer la lisibilité des cernes, jusqu'à ce que toute leur surface soit uniformément brillante.

2- Analyse en laboratoire

Le travail en laboratoire commence par le pointage des échantillons, à l'aide de deux loupes binoculaires Leica MS5 et MZ6 (x 0,63 à x 6). Il permet leur datation et la mise en évidence des années caractéristiques, comme les cernes larges (CL) et les cernes étroits (CE), les fluctuations de bois final (FBF), etc. Les résultats sont reportés dans un tableau afin de vérifier le synchronisme des échantillons. Chaque décennie est notée par un point au crayon sur les cernes de chaque carotte, un demi-siècle par deux points, et un siècle par trois points.

La mesure des largeurs des cernes est faite avec deux bancs manuels LINTAB 5 et 6, associés à un enregistreur automatique : le logiciel TSAPWIN. Une chronologie de référence a ainsi été établie pour chacune des trois espèces. Les échantillons d'arbres vivants, et leur courbe de croissance sont traités par espèce. Le synchronisme des courbes d'accroissement des deux rayons, réalisé grâce aux deux carottes de chaque individu, est vérifié afin d'éviter les anomalies de croissance (cerne manquant ou incomplet, faux-cerne). La moyenne des deux rayons est réalisée et permet d'avoir l'accroissement moyen de l'individu. Dans un deuxième temps, une chronologie de référence est établie pour chacune des espèces en faisant la moyenne de l'accroissement moyen de chaque individu. La validité des mesures effectuées est ensuite vérifiée. Le logiciel COFECHA est utilisé, car il vérifie d'une façon statistique la qualité de l'interdatation (Lebourgeois & Merian, 2012). L'étape suivante est la standardisation. Elle transforme les valeurs de largeurs de cernes en indices de même dimension, et permet ainsi d'uniformiser les variations de croissance en enlevant les différences d'accroissement liées à l'âge des différents échantillons d'arbres. Les échantillons deviennent ensuite comparables entre eux (Lebourgeois & Merian, 2012).

La dernière étape est l'interdatation afin de déterminer l'année de mort des arbres correspondants. Pour ces échantillons, les

courbes d'accroissement sont traitées par espèce. Les étapes sont les mêmes que pour le protocole précédent : la moyenne des deux rayons par arbre est faite. Ensuite, chaque courbe de moyenne est superposée à la chronologie de référence totale des arbres vivants de son espèce. La courbe des échantillons de l'arbre mort est superposée avec celle de la chronologie de référence de façon à trouver l'année de mort de l'individu. Pour les cèdres et les pins d'Alep, il faut prendre en compte une certaine marge d'erreur, car un arbre peut ne pas produire de cerne sur toute sa circonférence durant les années avant sa mort ou seulement des cernes très minces montrant qu'il survit péniblement.

3- Traitement des données climatologiques

Grâce au site internet du programme international de recherche HyMeX (<http://www.hymex.org/>), des données climatologiques, enregistrées sur plusieurs stations près du lac du Salagou, sont extraites afin d'obtenir pour chaque année entre 1979 et 2010 : les températures minimales et maximales moyennes mensuelles, et le cumul mensuel de la pluviométrie. Pour chaque saison sur cette période, une moyenne des températures minimales, maximales et le cumul de la pluviométrie sont calculés afin d'obtenir un climat global de la région, car il n'y a aucun relevé constant dans la région durant les 30 dernières années.

Afin de mettre en relation les conditions climatiques favorables ou défavorables à la croissance radiale des arbres, un test de corrélation de Pearson est réalisé pour comparer la distribution de deux variables (Lebourgeois & Merian, 2012). Au total, 27 tests ont été effectués (à l'aide du logiciel EXCEL) pour chaque espèce : la corrélation est faite entre les facteurs de pluviométrie, de température minimale, de température maximale enregistrés (en fonction des quatre saisons et de printemps-été, été-automne, automne-hiver, hiver-printemps pour chaque année) et les moyennes des mesures des différents cernes en fonction des années. Une corrélation est considérée comme forte si elle

est comprise dans les intervalles [-1 ; -0.5] et [0.5 ; 1] (Zarrouk, 2011).

RESULTATS

Lors du pointage des échantillons, trois carottes ont été retirées pour le traitement des résultats. Le pin d'Alep 06 et le pin pignon 09 présentaient des problèmes dans la lecture des cernes (nombreuses fluctuations, cernes manquants). Le cèdre de l'Atlas 05 a été écarté suite à une erreur de manipulation.

Les chronologies de référence des trois espèces présentent un synchronisme très marqué, et mettent en évidence certaines années caractéristiques chez les trois espèces (Fig. 1).

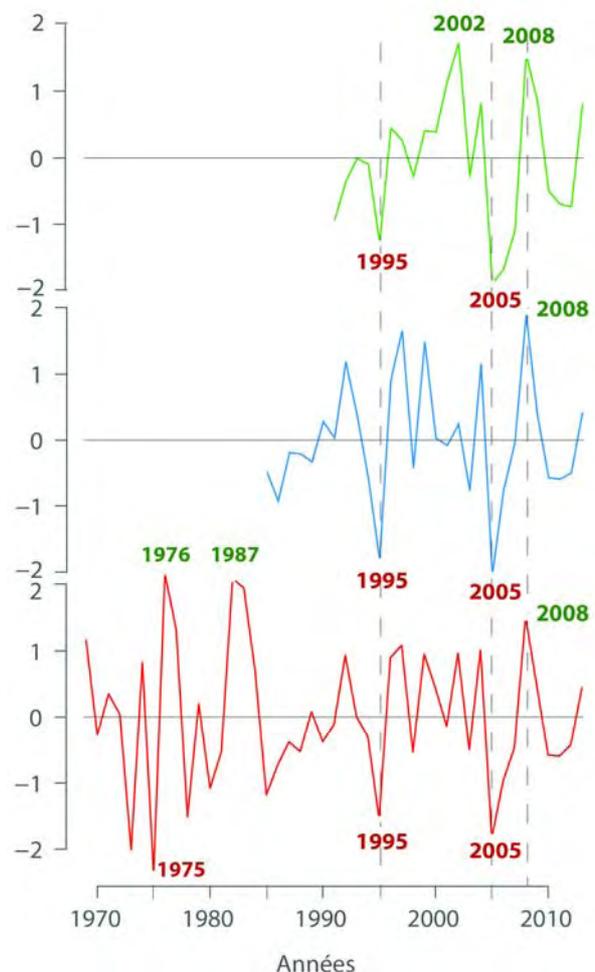


Figure 1. Courbes moyennes standardisées des trois espèces de Pinaceae étudiées : Pinus pinea (en vert), Cedrus atlantica (en bleu) et Pinus halepensis (en rouge).

Pour le pin pignon, 2002 est l'année de plus forte croissance, alors qu'elle est moins favorable pour les deux autres essences. Les années de croissance les plus favorables pour le pin d'Alep sont 1976 et 1982. Cette espèce présente deux cernes étroits en 1985 et 1986 (arbres les plus âgés). Deux années de très faible accroissement sont observées en 1995 et 2005, ainsi que des années à fort accroissement en 2008 pour les 3 espèces. Les deux années caractéristiques à très faible croissance (1995 et 2005) encadrent une décennie au cours de laquelle les trois espèces, bien qu'elles aient toutes des indicateurs de croissance plus positif que négatif, ne réagissent pas de la même manière. Alors que le pin d'Alep voit la taille de ses cernes varier fortement (quatre amplitudes de même valeur), le cèdre subit moins de variations (trois fortes amplitudes et une faible) et le pin pignon encore moins (une forte amplitude et deux faibles). Les trois essences disposent de trois cernes étroits successifs correspondant aux années 2009,

2010, 2011. En 2013, elles ont un cerne plus large.

L'accroissement radial du cèdre montre une bonne corrélation avec les précipitations cumulées du printemps et de l'été ($r=0,61$; $p<0,01$) et les précipitations printanières ($r=0,52$; $p<0,01$), et une corrélation non significative avec les précipitations cumulées d'automne et d'hiver ($r=0,70$). La croissance du pin d'Alep est bien corrélée avec la pluviométrie estivale ($r=0,48$; $p<0,01$), la pluviométrie du printemps et de l'été ($r=0,43$; $p<0,05$) et la température minimale de l'été et de l'automne ($r=0,45$; $p=0,01$). Pour le pin pignon, deux coefficients de corrélation se démarquent pour la température minimale : significatif en automne et en hiver ($r=0,50$; $p<0,05$) et non significatif en hiver ($r=0,50$). La corrélation entre les facteurs météorologiques annuels et la croissance des cernes est faible (elle varie entre un minimum de $-0,05$ et un maximum de $0,2$; [Table 1](#)).

		Printemps		Été		Automne		Hiver		Année	
		r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
<i>Cedrus atlantica</i>	Pluv.	0.52	**	0.39	ns	0.03	ns	0.08	ns	0.12	ns
	Tmin	0.15	ns	-0.36	ns	-0.05	ns	0.43	*	0.08	ns
	Tmax	0.17	ns	-0.31	ns	-0.14	ns	0.43	*	0.03	ns
<i>Pinus halepensis</i>	Pluv.	0.30	ns	0.48	**	0.08	ns	0.12	ns	-0.08	ns
	Tmin	-0.01	ns	-0.11	ns	0.22	ns	0.38	*	0.15	ns
	Tmax	-0.17	ns	-0.44	*	-0.04	ns	0.23	ns	-0.23	ns
<i>Pinus pinea</i>	Pluv.	0.41	ns	0.13	ns	0.15	ns	0.05	ns	0.12	ns
	Tmin	-0.28	ns	-0.16	ns	0.12	ns	0.50	*	0.05	ns
	Tmax	0.08	ns	-0.14	ns	0.12	ns	0.37	ns	-0.05	ns

		Printemps-Été		Automne-Hiver		Été-Automne		Hiver-Printemps	
		r	p	r	p	r	p	r	p
<i>Cedrus atlantica</i>	Pluv.	0.61	**	0.70	ns	0.16	ns	0.41	ns
	Tmin	-0.12	ns	0.33	ns	-0.24	ns	0.35	ns
	Tmax	-0.07	ns	0.30	ns	-0.30	ns	0.36	ns
<i>Pinus halepensis</i>	Pluv.	0.43	*	0.00	ns	0.38	*	-0.27	ns
	Tmin	0.01	ns	0.43	*	0.45	*	-0.27	ns
	Tmax	-0.26	ns	0.31	ns	-0.08	ns	-0.12	ns
<i>Pinus pinea</i>	Pluv.	0.38	ns	0.14	ns	0.17	ns	0.30	ns
	Tmin	0.07	ns	0.50	*	-0.01	ns	0.43	ns
	Tmax	-0.04	ns	0.37	ns	-0.03	ns	0.27	ns

Table 1. Résultats des tests de corrélations de Pearson. r, coefficient de corrélation ; p, p-value (**<0.0, très significatif ; * <0.05, significatif ; ns, non significatif)

Le peuplement de pins d'Alep est plus âgé que ceux des deux autres espèces (Fig. 2B). Les années de plantation des plus vieux arbres étudiés sont : 1969 pour le pin d'Alep, 1984 pour le cèdre de l'Atlas (Fig. 2C) et 1990 pour le pin pignon (Fig. 2A). Sur le site d'échantillonnage, aucun pin pignon mort n'a été trouvé. En revanche, des prélèvements ont pu être exécutés sur deux pins d'Alep et dix

cèdres morts. La cohorte de cèdres morts sur le site d'étude est beaucoup plus importante que celle des pins d'Alep. Les cèdres, âgés en moyenne d'une vingtaine d'années, voire moins pour certains (C08 et C10), sont tous morts entre 2007 et 2013 (Fig. 2D). Le pin d'Alep PAM01, âgé de 30 ans est mort en 2007 et le deuxième, âgé de 20 ans, est mort en 2009 (Fig. 2B).

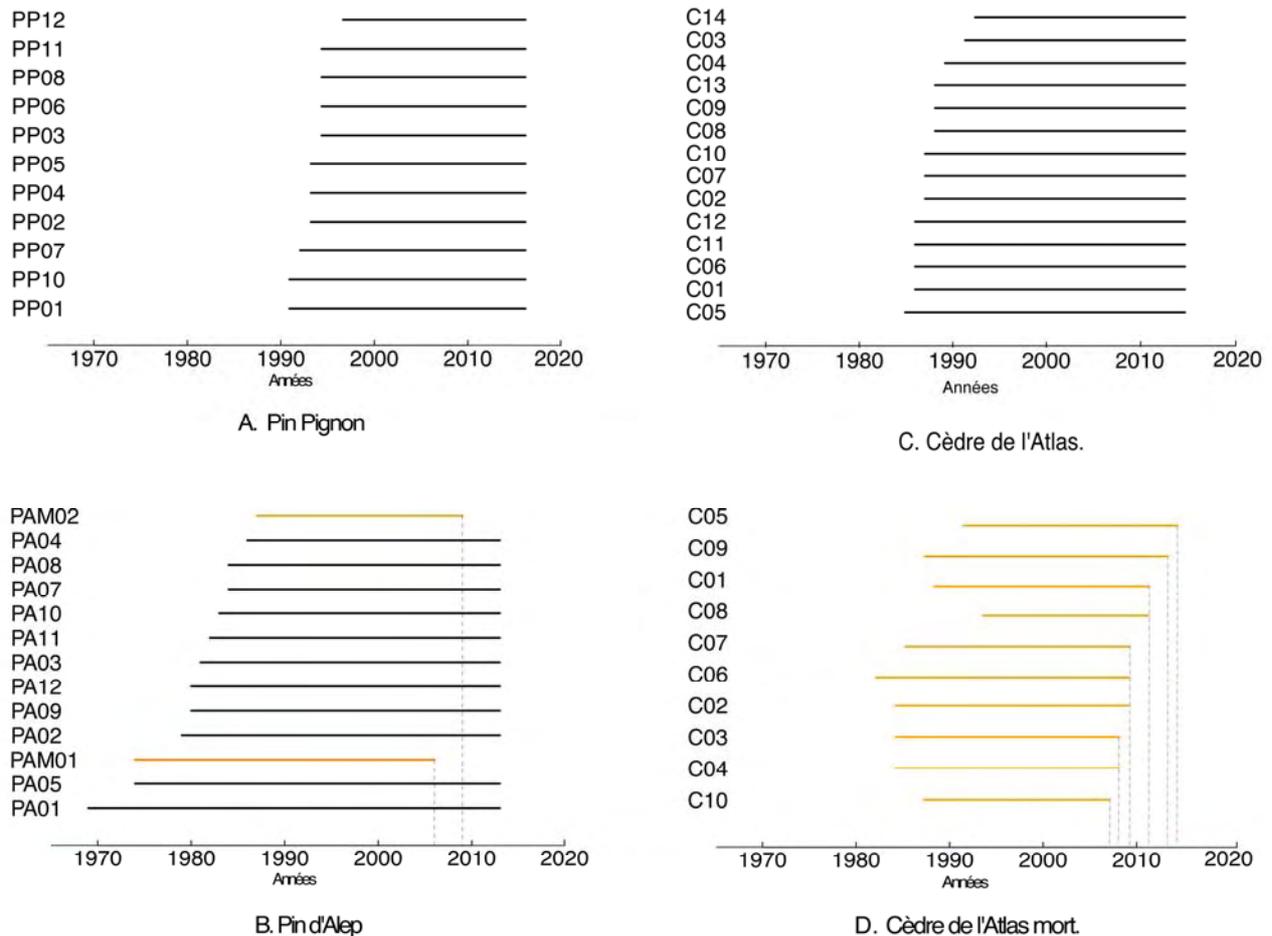


Figure 2. Diagramme comparatif des différentes structures de population des trois Pinaceae. Arbres vivants représentés par un trait noir et arbres morts par un trait orange.

Les années 1995 et 2005, caractérisées par des cernes étroits chez les trois essences (Fig. 1), sont des années à très faibles précipitations (Fig. 3). En 1995, des pluviométries en dessous de la moyenne sont relevées au printemps et en hiver (Fig. 3C, D). La pluviométrie estivale de 2005 est la plus basse en 30 ans. Les années 2002 et 2008, qui sont des années de fort accroissement pour les trois espèces (Fig. 1), se caractérisent par une

pluviométrie importante. L'automne de l'année 2003 correspond à la saison détenant la pluviométrie la plus forte (épisode cévenol) sur toutes les saisons confondues et sur 30 ans avec 266.26 mm (Fig. 3B). Pour les températures (Fig. 4), des années caractéristiques ressortent : 1985, 2003 et 2004. Pour 1985, année correspondant à un cerne étroit chez le pin d'Alep, un léger pic de température maximale en été (29,1°C) est relevé (Fig. 4C).

Entre 2003 et 2004, une forte amplitude de changement de température est observée : l'année 2003 présente des températures maximales (23°C) et minimales (12°C) plus élevées que la moyenne (respectivement 20 et

10,5°C ; Fig. 4E), tandis que l'année 2004 présente des températures maximales (16,5°C) et minimales (7,5°C) plus faibles que la moyenne.



Figure 3. Pluviométrie moyenne de la région du lac du Salagou.
L'échelle des abscisses représente la période de temps considérée (1979-2010).
De gauche à droite et de haut en bas : printemps, été, automne, hiver, année.

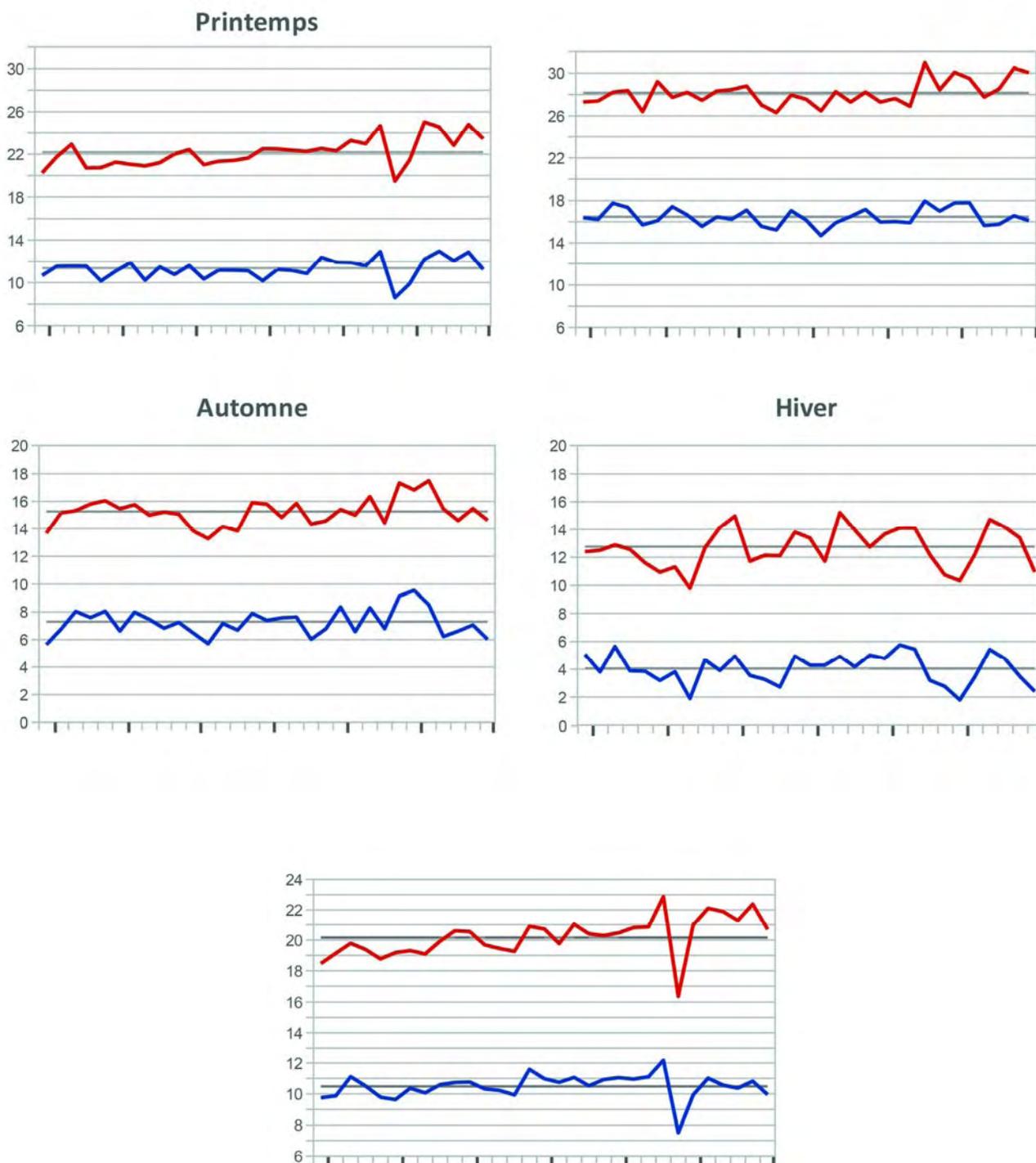


Figure 4. Températures moyennes de la région du lac du Salagou.

Températures maximales en rouge et minimales en bleu. L'échelle des abscisses représente la période de temps considérée (1979-2010). De gauche à droite et de haut en bas : printemps, été, automne, hiver, année.

DISCUSSION

La croissance des arbres est très sensible aux fluctuations des différents facteurs météorologiques, tels que les précipitations et la température (Becker, 1989 ; Merian & Lebourgeois, 2011). La réponse des trois

espèces à ces facteurs est comparable. La croissance du pin pignon semble toutefois être moins influencée, ce qui peut s'expliquer par la jeunesse du peuplement (Fig. 2A). D'après Jaouen (2007), les jeunes arbres ont tendance à croître en hauteur pour aller chercher la lumière, c'est pourquoi l'impact des facteurs

environnementaux serait alors plus visible en étudiant leur croissance en hauteur en complément de la croissance des cernes.

D'après les graphiques (Fig. 1), l'année 2008 est remarquable par la forte croissance radiale (cerne large) des trois espèces, avec des croissances variant d'un indice de 1,5 à plus de 2. Or, cette année est marquée par des températures globalement au dessus des moyennes pour la période de 1979 à 2010 (Fig. 4A). Les conditions caractéristiques favorisant la croissance en 2008 sont des températures moyennes en été et en automne, et des températures plus élevées au printemps et en hiver. Au contraire, les années 1995 et 2005 montrent des cernes très étroits pour les trois espèces, qui correspondent aux années difficiles (températures trop basses ou trop hautes, trop ou pas assez de pluie). Par exemple, l'indicateur de croissance de l'année 2005 pour les trois espèces varie de - 1,5 à - 2 (Fig. 1). Cette année-là, les précipitations annuelles sont en dessous de la moyenne, alors que les températures minimales et maximales estivales sont au dessus. En 2008, la pluviométrie printanière est de 95,7 mm et la pluviométrie estivale de 18,6 mm ; ces valeurs sont divisées par deux en 2005. Les arbres n'ont pas pu avoir une réserve en eau suffisante pour permettre un bon débourrement au printemps. La sécheresse estivale est aussi une des causes de la faible croissance des arbres en 2005.

Les coefficients de corrélation de Pearson montrent que l'accroissement radial annuel est plus lié aux conditions climatiques saisonnières qu'aux conditions annuelles. Ce sont les variations météorologiques saisonnières qui influent sur la croissance des arbres.

Les coefficients de corrélations de Pearson montrent que la pluviométrie du printemps et de l'été sont les facteurs climatiques qui influencent le plus la croissance du cèdre de l'Atlas ($r= 0,61$; $p<0.01$; Table 1). Le cèdre de l'Atlas est une espèce sensible à la sécheresse, nécessitant une forte pluviométrie, et se développant normalement à des températures comprises entre 7,5 et 15°C (Courbet et al., 2012). Or, les températures moyennes minimales et maximales de 2004

sont plus faibles que celles de 2008 (Fig. 4), et la pluviométrie annuelle est plus élevée (330,1 mm pour 2004 et 280,2 mm pour 2008 ; Fig. 3). L'année 2004 devrait alors être une année à croissance plus importante qu'en 2008, ce qui n'est pas le cas (Fig. 1). Ceci suggère que la croissance du cèdre de l'Atlas serait soumise à d'autres facteurs environnementaux.

Pour le pin d'Alep, les coefficients de corrélations de Pearson montrent que sa croissance radiale est la plus impactée par la pluviométrie de l'été ($r= 0,48$; $p< 0.01$) et la température minimale moyenne en été et en automne ($r= 0,45$; $p= 0.01$). Le pin d'Alep étant une espèce xérophile, il semble logique que son indice de croissance soit corrélé avec la température minimale moyenne en été et en automne. Le pin d'Alep possède une faible croissance radiale en 1975, 1978 et 1985. Les deux premières années ne peuvent être expliquées car leurs données météorologiques nous sont inconnues. L'année 1985 présente des précipitations printanières et estivales faibles ; les températures moyennes de cette année sont assez basses, ce qui pourrait expliquer la faible croissance de cette espèce. Le pin d'Alep montre de forts taux d'accroissement durant les années 1976 et 1987. La croissance en 1976 ne peut être expliquée par manque de données. L'année 1987 n'a pas de forte pluviométrie au printemps et en été, ni de température élevée en été et en automne. Or le pin d'Alep a eu une très forte croissance. Cette année souligne la limite des coefficients de corrélation de Pearson, qui ne testent qu'un paramètre à la fois et non les interactions entre ces différents paramètres. La moyenne des températures minimales en été et en automne 2010 est la plus faible en trente ans (11,06°C) ; c'est une année où la croissance est faible, ce qui pourrait s'expliquer par la sensibilité du pin d'Alep aux températures minimales en été et en automne.

Pour le pin pignon, les coefficients de corrélation de Pearson montrent que c'est la température minimale en hiver ($r= 0.50$; $p< 0.05$) et les températures minimales en automne et en hiver ($r= 0.50$; $p< 0.05$) qui

ont un impact sur sa croissance. Ceci est cohérent car le pin pignon est une essence héliophile et thermophile, se développant de manière optimale dans un étage bioclimatique méditerranéen, variante humide à semi-aride. D'après l'IFN (2001), il est sensible aux basses températures et ce, d'autant plus que l'atmosphère est humide. Les années 2002 et 2008 ont été marquées par des hivers plus chauds que la moyenne (respectivement 4,76 et 5,44°C). Ces années correspondent à des fortes croissances radiales chez le pin pignon. Cependant, les données climatiques ne permettent pas de généraliser une relation entre la température et la croissance du pin pignon. En effet, en 2008, année de forte croissance, la température était plus élevée que la moyenne, tandis qu'en 2002, elle était moins élevée, alors que la croissance était plus forte. En 2005, année où le cerne est le plus étroit, la température était plus élevée que la moyenne, tandis qu'en 1995, elle était plus faible.

En ce qui concerne les causes de la mort des arbres échantillonnés, la comparaison des résultats obtenus avec les données météorologiques permet d'émettre des hypothèses. Le cèdre de l'Atlas a une aire de répartition naturelle allant de 700 à 1200 m d'altitude et recevant entre 800 et 1500 mm de précipitations annuelles (Courbet et al., 2012). Or, le sommet du site d'étude est à un peu plus de 300 m, et ses besoins pluviométriques et de thermiques ne sont pas respectés (la pluviométrie maximale annuelle est de 505,6 mm). Ces arbres plantés ne sont donc pas dans un milieu favorable. Contrairement au pin d'Alep, le cèdre de l'Atlas n'est pas en mesure d'économiser l'eau en raison de la faible régulation stomatique de sa transpiration (Courbet et al., 2012). Les arbres étudiés sont morts entre 2007 et 2013 : dans cet intervalle, les températures maximales estivales étaient plus élevées que la moyenne. Pour les deux pins d'Alep morts en 2007 et 2009, il est difficile de trouver une explication. Cette espèce s'est développée spontanément dans le site d'étude et le climat est favorable à son développement. Les individus morts de pin d'Alep sont rares dans la zone échantillonnée. Ils étaient porteurs de

chenilles processionnaires, mais les autres arbres de la population de pin d'Alep également, et il n'y a pas de traces de champignons ou de parasite qui aurait pu les affaiblir.

CONCLUSION

Cette étude des relations entre le climat et l'accroissement radial de trois espèces de Pinaceae a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs. Les variations météorologiques saisonnières interannuelles ont un impact sur la croissance radiale des arbres, mais chaque espèce ne réagit pas de la même manière à ces variations environnementales. Le pin pignon qui est une essence thermophile est plus sensible aux températures basses en hiver, susceptibles de ralentir sa croissance. Le pin d'Alep, lui, nécessite un fort ensoleillement et un sol sec et drainant. Il semble plus sensible à la pluviométrie au printemps et en été, ainsi qu'aux températures minimales en été et en automne. Le cèdre de l'Atlas est, contrairement aux deux autres espèces, très sensible à la sécheresse. Il semble logique que sa croissance radiale soit impactée par les précipitations au printemps et en été.

Sur le site d'étude du lac du Salagou qui est situé dans une région au climat méditerranéen, chaud et sec en été et où la température descend rarement en dessous de 0°C en hiver, le constat est flagrant. Le pin pignon et le pin d'Alep semblent les mieux adaptés à ces conditions climatiques, même s'il est difficile d'identifier les causes de la mortalité de certains arbres étudiés. En revanche, le cèdre de l'Atlas, qui a besoin de températures plus fraîches, ne semble pas adapté à ce type de milieu.

Pour des plantations futures de résineux à des fins de restauration écologique, il serait donc judicieux de tenir compte davantage de l'écologie des différentes espèces pour pouvoir planter celles qui sont le mieux adaptées au milieu concerné, et qui pourraient donc croître et se reproduire dans des conditions optimales.

REFERENCES

- Auzet V. & Lilin C. (1989). Rapport français sur l'état des connaissances actuelles en matière de protection des sols contre l'érosion en région méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne*, 11 : 158-166.
- 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.
- Boudy P. (1952). *Guide du forestier en Afrique du Nord*. Éd. La Maison Rustique, Paris, 505 p.
- Bunn A.G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28 : 251-258.
- Cook E.R. (1987). The decomposition of tree ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47 : 37-59.
- Courbet F., Lagacherer M., Marty P., Ladier J., Ripert C., Nivert P., Huard F., Amandier L. & Paillassa E. (2012). *Le Cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandation*. Document RMT AFORCE, 29 p.
- El Khorchani A., Gadbin-Henry C., Bouzid S. & Claude A. (2007). Impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 18 : 113-21
- GIEC (2002). *Les changements climatiques et la biodiversité*. Document technique V du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 89 p.
- GIEC (2008). *Changements climatiques 2007*. Rapport de synthèse, 114 p.
- Jaouen G. (2007). *Étude des stratégies biomécaniques de croissance des jeunes arbres en peuplement hétérogène tropical humide*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 217 p.
- Kambérou A., Palazzi S., Mas B., Fraisier D. & Hébraud F. (2010). *Construire, réhabiliter, aménager dans le site classé de la vallée du Salagou et du cirque de Mourèze*. Guide de recommandations de la charte pour l'architecture, l'urbanisme et les paysages, 142 p.
- Lebourgeois F. & Merian P. (2012). *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. LERFOB, AgroPariTech, Centre de Nancy, 85 p.
- Lehout A. (2008). *Limites thermiques et adaptation de Pin Pignon dans la région de Constantine*. Mémoire de Magistère, Université Mentouri, Constantine, 217 p.
- Merian P. (2012). Pointer et Dendro : deux applications sous R pour l'analyse de la réponse des arbres au climat par approche dendroécologique. *Revue Forestière Française*, 64 : 789-798.
- Merian P. & Lebourgeois F. (2011). Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: A multispecies analysis. *Forest Ecology and Management*, 261 : 1382-1391.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G. & Gauberville C. (2008). *Flore forestière française, guide écologique illustré, région méditerranéenne*. Éd. Institut pour le développement forestier, Paris, 2432 p.
- Rensing K.H. & Samuels A.L. (2004). Cellular changes associated with rest and quiescence in winter-dormant vascular cambium of *Pinus contorta*. *Trees*, 18 : 373-380.
- Toth J. (1980). Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière. *Forêt Méditerranéenne*, 2 : 23-30.

ANNEXE 1.
Localisation des zones étudiées

