



HAL
open science

Mont Lozère (2)

Jean-Frederic Terral, Serge D. Muller

► **To cite this version:**

Jean-Frederic Terral, Serge D. Muller. Mont Lozère (2). 14 (1), <https://biologie-ecologie.com/ORPAL/Orpalm-Synthesis-2021-14-1.pdf>, 2021. hal-04894628

HAL Id: hal-04894628

<https://hal.science/hal-04894628v1>

Submitted on 24 Jan 2025

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

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

Public Domain

Orpalm

Synthesis

2021 - No 14 (1)



Mont Lozère (2)



ORPALM Synthesis

Revue bisannuelle
de Paléocécologie
n°14 (1) - Année 2021

Editeurs en chef
Jean-Frédéric TERRAL^{1,2}
Serge MULLER^{1,2}

Editeurs associés
Laurent BRÉMOND^{1,3}
Lucas DUGERDIL^{1,2}
Vincent GIRARD^{1,2}

¹ISEM, ²UM2, ³EPHE

Auteurs

Alice BOMBEAU, Amandine
CARTIER, Flavie CHARIEAU, Pierre
CREUSOT, Alexia DELANDHUY,
Julian GENTILE, Marie LARRIEU,
Théo MAISONHAUTE, Carlo MUSCO
DE CAIRES, Léa D'OLIVEIRA,
Adrien WALES, Alexandra ZITOUNI

Travail éditorial
Serge MULLER

Publication
2^e trimestre 2021
Université de Montpellier

ORPAM 2020-2021 : Le pin sylvestre, pionnier de service

S'il est un arbre omniprésent dans les Cévennes cristallines septentrionales et particulièrement abondant sur les rives de la tourbière du Peschio, terrain de jeu de la saison 2020 d'ORPAM, il s'agit bien du pin sylvestre, *Pinus sylvestris* L. (Pinaceae), dont l'importance et la renommée s'enracinent bien au-delà du sud du Massif Central. Son feuillage clair offre un sous-bois suffisamment lumineux pour permettre l'installation de bruyères, de myrtilles, d'airelles et de framboisiers. Les Cervidés viennent brouter sous ses frondaisons et les renards, martres et blaireaux y trouvent un complément alimentaire de premier choix. Ses houppiers n'en sont pas moins utiles puisqu'ils accueillent mésanges, roitelets, grimpeaux, pics, pigeons ramiers et rapaces qui viennent se reproduire et nidifier.

Le pin sylvestre est en effet l'espèce de pin la plus répandue au monde. D'ouest en est, son immense aire de distribution s'étend depuis l'Espagne, le nord de l'Ecosse, la Scandinavie (Suède et Finlande essentiellement), l'Europe centrale jusqu'à la Russie Orientale. Ses peuplements connectent donc l'Océan Atlantique à l'Océan Pacifique. Il se distribue dans une large gamme d'altitudes, du niveau de la mer dans les contrées les plus septentrionales à plus de 2600 m dans les montagnes du Caucase.

Les immenses forêts de pin sylvestre de Sibérie sont les plus vastes peuplements monospécifiques du monde. Une telle étendue géographique implique donc que l'espèce est très variable génétiquement.

Aussi, elle comprend plusieurs sous-espèces et variétés. Malgré sa diversité génétique, le pin sylvestre est plutôt facile à reconnaître grâce à son écorce rouge-orangée caractéristique et ses petites aiguilles (pseudophylles) bleutées regroupées par deux au sommet d'un axe court, le brachyblaste.

Le pin sylvestre occupe des habitats variés et mais se développe généralement sur des sols pauvres en nutriments où il s'enracine de manière superficielle. Les conditions édaphiques des landes acides de la partie septentrionale des Cévennes et de la Margeride lui conviennent parfaitement. C'est une espèce pionnière exigeante en lumière qui peut coloniser des zones récemment perturbées si la concurrence et la pression du pâturage sont faibles. Il est tolérant à la sécheresse et résiste très bien au gel. Cependant, il ne supporte pas la pollution atmosphérique ou les embruns et, sur les sites plus fertiles, il est souvent concurrencé par d'autres espèces. Il a besoin d'une période de froid pour rompre la dormance hivernale et commence à pousser au printemps lorsque les températures atteignent environ 5°C. Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, il est fort à parier que son aire s'étende au nord, mais qu'il décline dans les parties méridionales de son aire de répartition.

En Europe, on le trouve en association avec des feuillus comme les chênes caducifoliés (chêne sessile, *Quercus petraea* et chêne pubescent, *Quercus pubescens*), le hêtre (*Fagus sylvatica*) et le bouleau (*Betula pendula*), d'autres conifères comme l'épicéa (*Picea abies*), le mélèze (*Larix decidua*), le sapin (*Abies alba*) et d'autres pins, comme les pins noirs (*Pinus nigra*) ou le pin à crochets (*Pinus uncinata*), avec lesquels il peut s'hybrider.

Par ailleurs, le pin sylvestre est une espèce très importante sur le plan culturel et économique. Son bois est en effet très apprécié pour son bon rapport masse/résistance. Il se travaille facilement et est utilisé comme bois de construction, mais aussi pour l'ameublement et la pâte à papier. Faiblement putrescible, il résiste bien aux conditions humides et était autrefois utilisé pour les étais de mines, les roues hydrauliques et la fabrication de pieux. En Europe de l'Est et dans l'ex-URSS, il était exploité pour la collecte de résine.

Le pin sylvestre a été et est fréquemment utilisé à des fins de restauration / reforestation de terrains incultes ou de zones fortement perturbées, comme dans le Massif Central au 19^{ème} siècle, en particulier dans les Cévennes.



La tourbière du Peschio bordée d'une lande à callune (*Calluna vulgaris*) colonisée par le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*)

« De l'écologie et de la pédagogie avec de l'humain dedans ! ». Au niveau de connaissances, de compétences et de savoir-faire d'étudiants de 3^{ème} année de Licence Sciences de la Vie / Ecologie Biologie des Organismes, les travaux d'ORPAL restent évidemment perfectibles. Toutefois, cette perfectibilité s'efface largement devant le bilan méthodologique, scientifique et humain de cette école de terrain et du stage en laboratoire qui a suivi. La conduite d'ORPAL a su intégrer les multiples facettes du processus de la recherche fondamentale sans en perdre de vue la dimension humaine et tout en apportant une réelle plus-value pédagogique.

Un grand merci (1) au département Biologie-Ecologie (Faculté des Sciences, Université de Montpellier) et à l'Institut des Sciences de l'Evolution-Montpellier (ISEM, UMR 5554) laboratoire de recherche leader en France, soutien de l'innovation pédagogique et qui nous permet de développer depuis des années, grâce à la mise à disposition de plateaux techniques, cet apprentissage par la recherche et pour la recherche ; (2) à Mireille Mazoyer pour son accueil aux gîtes communaux du Pont-de-Monvert ; (3) au Parc National des Cévennes de nous avoir permis de travailler sur la tourbière du Peschio ; (4) à Laure Paradis et Sarah Ivorra (Ingénieures d'étude CNRS) dont le soutien nous est, comme chaque année, fondamental ; (5) à Emeric Sulmont qui nous a, une fois encore, fait l'amitié et l'honneur de rejoindre l'équipe sur le terrain. Ses connaissances naturalistes, écologiques et historiques ont été capitales.

L'équipe pédagogique était cette année constituée de : Lucas Dugerdil (doctorant, ancien Master Orpamien), Laurent Bremond, Benoît Brossier, Vincent Girard, Serge Muller et Jean-Frédéric Terral.

Jean-Frédéric Terral, éditeur en chef d'ORPALM Synthesis



*Petit jeu offert avec votre no ORPALM 2021
Cherchez l'intrus-e : dans ce groupe de paysans cévenols en train de faucher le blé sauvage,
un seul personnage a l'air d'être en vacances à Hawaïi.*

ORPAL & ORPAM : modules d'enseignement-recherche avec de vrais morceaux d'humain dedans

ORPAL & ORPAM en bref

ORPAL et ORPAM sont des unités d'enseignement (UE) respectivement proposées en L3 Sciences de la Vie (SV) et en M1 Biodiversité-Ecologie-Evolution parcours Cepage, UFR Fac des Sciences, Département d'enseignement Biologie-Ecologie, Université de Montpellier.

Contenu pédagogique

Sur la thématique de la reconstruction des environnements passés, ces UE sont quasi-exclusivement dévolues 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.

Apport pour les étudiants

ORPAL et ORPAM sont des UE originales et novatrices. Elles permettent aux étudiants de : découvrir le monde secret de la recherche, se former par la recherche à travers un stage conventionné dans 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.

Organisation des modules

Les étudiants, répartis en binômes ou 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.

Déroulement d'ORPAL-ORPAM

Etape 1/5 : Briefing méthodologique

La reconstruction des paléoenvironnements : pourquoi et comment ? Organisation des modules, objectifs pédagogiques, méthodes.

Etape 2/5 : Stage de terrain

24 heures de terrain, réparties sur trois jours consécutifs, permettent aux groupes d'appliquer diverses méthodes paléoenvironnementales. Ces stages ont lieu dans des zones bien circonscrites d'un point de vue géographique et écologique : région du Pic St-Loup et littoral languedocien pour ORPAL ; sites d'étude modifiés chaque année pour ORPAM.

Etape 3/5 : Stage en laboratoire

Sous la responsabilité d'un encadrant, travail de laboratoire, analyse des données, travail bibliographique. Une journée par semaine.

Etape 4/5 : Rédaction et présentation orale

Rédaction d'un mémoire synthétique sous la forme d'un article scientifique et intégration des corrections faites par un rapporteur. Le module se clôt par une présentation orale.

Etape 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 la forme).

Mise en garde : Les articles présentés dans cette revue, bien que corrigés par les équipes pédagogiques, sont des travaux réalisés par des étudiants de 3^e et 4^e années. Ce sont des exercices d'initiation à la rédaction scientifique, avec une visée plus méthodologique que factuelle.

ORPAL : *n.m.* Acronyme d' « Outils et méthodes de la Reconstruction des PALéoenvironnements – Licence ». UE de l'Université de Montpellier, lancée en 2006-2007.

ORPAM : *n.m.* Acronyme d' « Outils et méthodes de la Reconstruction des PALéoenvironnements – Master ». UE de l'Université de Montpellier, lancée en 2015-2016.

ORPALM Synthesis. Revue bisannuelle, créée en 2008 sous le nom *ORPAL Synthesis* pour publier les travaux réalisés dans le cadre de l'UE ORPAL, et rebaptisée en prévision de l'intégration, en 2015-2016, des travaux de l'UE ORPAM.

ORPAM 2020-2021

Mont Lozère (2)

Bonnet C. : <i>Petit manuel à l'usage des amateurs.trices de tourbières</i>	9
D'Oliveira L. & Zitouni A. : <i>Dynamique d'accumulation de tourbe dans le sud du Massif Central : focus sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère)</i>	21
Cartier A., Creusot P. & Delandhuy A. : <i>Étude palynologique de la dynamique végétale holocène de la tourbière du Peschio (Mont Lozère)</i>	37
Charieau F. & Larrieu M. : <i>Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio</i>	55
Gentile J., Maisonhaute T. & Wales A. : <i>Rhizopodes du sud de la France et étude exploratoire de la tourbière du Peschio (Mont Lozère)</i>	73
Bombeau A. & Musco de Caires C. : <i>Palynomorphes non-polliniques holocènes et modernes de la tourbière du Peschio (Lozère, France) : utilisation des spores coprophiles, saprophiles et des microalgues pour reconstruire les paléoenvironnements et le pastoralisme</i>	93



Le rossolis à feuilles rondes (Drosera rotundifolia, Droseraceae), est une petite plante carnivore assez commune dans les tourbières du Mont Lozère. Elle compense, par la carnivorie, le manque de nutriments dans la tourbe. C'est une espèce protégée au niveau national (photo : P. Creusot)

PETIT MANUEL A L'USAGE DES AMATEURS.TRICES DE TOURBIERES

Colline Bonnet ¹

*Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (UMR 5554)
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France*

¹ colline.bonnet@etu.umontpellier.fr

Citation : Bonnet C. (2021). Petit manuel à l'usage des amateurs.rices de tourbières. Orpalm Synthesis, 14 (1) : 9-20.



Drosera vous embarque dans un voyage initiatique entre sphaignes et linaigrettes, à la découverte d'une mystérieuse tourbière regorgeant de créatures excentriques, prêtes à vous dévoiler leurs pouvoirs magiques... Armez-vous de bottes jusqu'aux hanches, retrousses vos manches, assurez votre équilibre, verrouillez chevilles et genoux, affinez votre regard à l'horizontale, préparez-vous à trembler sur ce radeau de mousse, et, surtout, gare aux trous d'eau !

Ce court essai sur les caractéristiques de la tourbière ne se veut point exhaustif, mais plutôt accessible. Il invite à ouvrir ou nuancer son regard sur des milieux méconnus et

souvent simplifiés, mais qui pourtant relèvent d'une complexité sans pareille, et méritent le détour. Complexité qui augmentera graduellement au fil de la lecture, progression visant à renseigner tout.e lecteur.rice, quel que soit son niveau.

Ce manuel peut être utilisé comme support pédagogique, et chaque terme y est expliqué de la manière la plus variée et accessible possible. Il appartient néanmoins au lecteur ou à la lectrice d'approfondir la définition des notions abordées, notamment en multipliant les sources bibliographiques.

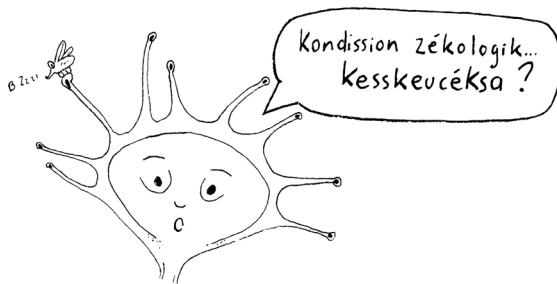
LA TOURBIERE, UN ECOSYSTEME ENTRE EAU ET SOL

La tourbière, c'est une zone humide. Une zone humide, c'est un endroit où les êtres vivants sont là parce qu'il y a de l'eau. Une eau qui recouvre la surface du sol ou imprègne la terre sur une faible profondeur (la mer n'est pas une zone humide !). La végétation des zones humides aime l'eau : elle est hygrophile (pas la même chose que potomane, mais pas loin). Les mares, les marais et les marécages, par exemple, sont des zones humides ! Ainsi que les étangs, avec grenouilles et nénuphars...

La tourbière, c'est comme une mare, mais colonisée par les végétaux, qui forment parfois des radeaux flottant sur l'eau.



Et puis, il y a des conditions écologiques particulières, qui expliquent la présence de la tourbière.



CONDITION ÉCOLOGIQUE, ça veut dire plein de choses à la fois. Cela comprend le régime hydrique, par exemple. Bon, en gros, d'où vient l'eau ? De dessus ? De dessous ? Comment vient-elle ? A quelle vitesse ? Est-ce qu'elle reste ? Est-ce qu'elle part ? ... On y reviendra plus tard !

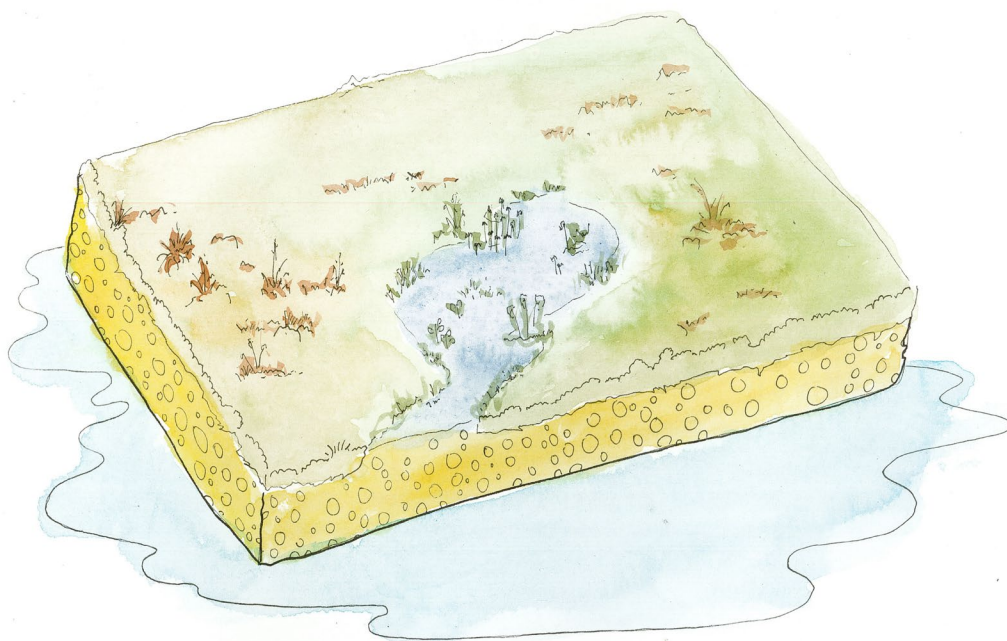


Il y a aussi la topographie. La forme du sol, quoi ! Est-ce qu'il est plat ? Ou moutonneux ? Est-ce qu'il fait des cuvettes ? Ou des bosses ? Là encore, on y reviendra... Et ces conditions si spécifiques, toutes réunies, permettent à la tourbe de se déposer.

La TOURBE, comme dans TOURBière.



Je t'explique... La tourbière, c'est comme une grosse éponge : elle est gorgée d'eau.



Cette eau stagne (ou alors elle bouge juste un tout petit peu), et comme elle stagne, une fois que tout l'oxygène a été respiré, le sol en est privé. D'habitude, il y a tout plein de bactéries et de champignons qui grignotent les plantes mortes, ils les décomposent et les recyclent. Mais là, comme il n'y a plus d'oxygène, il n'y a que peu de bactéries et de champignons. On appelle ça des conditions asphyxiantes ou anaérobies, ce qui veut plus ou moins dire « sans air ».

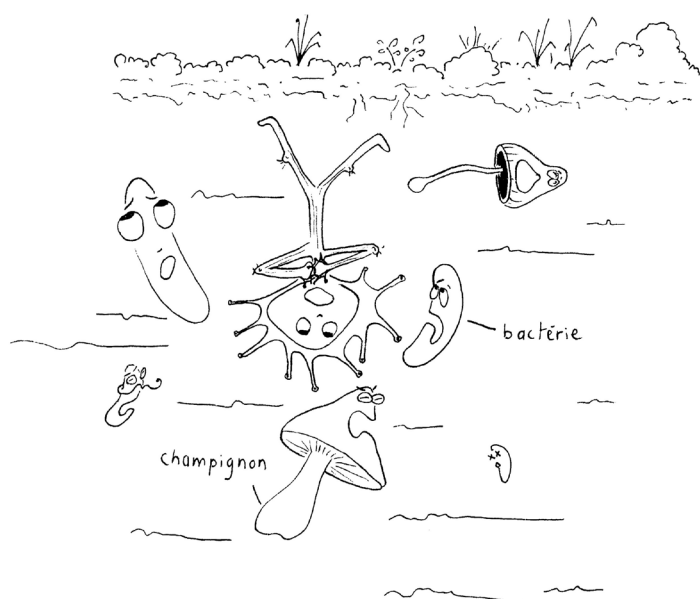
Donc, voilà notre litière végétale, toute contente de ne pas être recyclée, qui s'accumule verticalement. Elle fait un tas de plus en plus haut, forme un dépôt très épais et riche (en carbone) qu'on appelle...

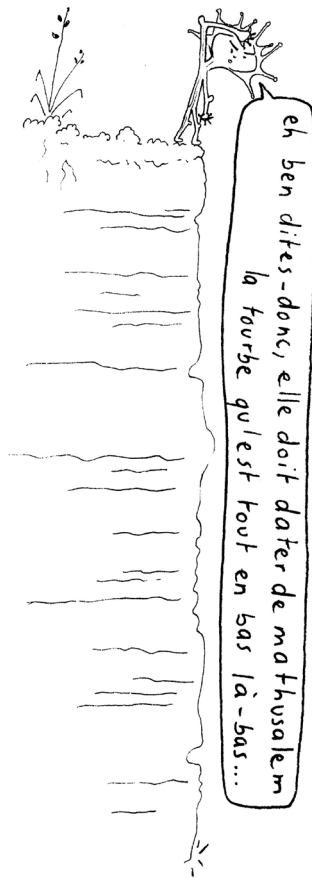
tatata...

la tourbe ! Oui, c'est bien elle, la fameuse tourbe !

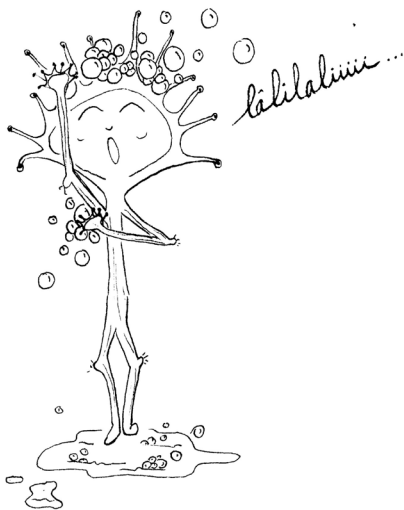
LA TOURBE, UNE ROCHE VEGETALE FOSSILE

Et oui, la tourbe est une sorte de sol organique (composé de matière issue d'êtres vivants) résultant d'une dégradation INCOMPLÈTE de débris végétaux. Je dis « sorte de sol », parce que dans un véritable sol (au sens pédologique), la matière organique se minéralise grâce aux champignons, aux bactéries et aux lombrics. Bon, si on résume drastiquement, c'est un peu des plantes qui poussent sur leur caca. La tourbe peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, parfois jusqu'à 10 m ! Tout ça, sous nos pieds...



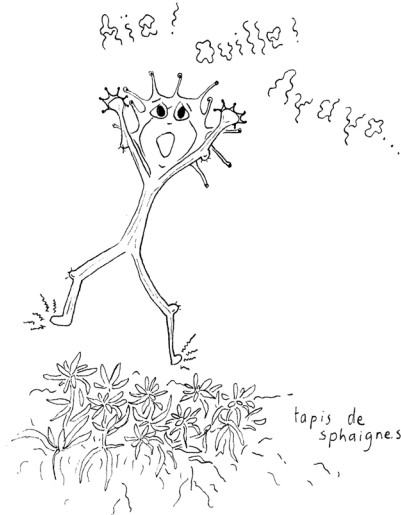


Pas étonnant que le sol tremble quand on y marche. Mais attention, ce ne sont pas n'importe quels végétaux qui édifient la tourbe ! Parmi les plus importants, on trouve les bryophytes ! Les mousses !

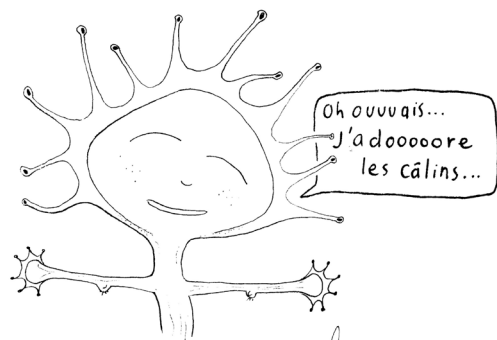


Mais non, enfin, pas ces mousses-là... Les bryophytes. De toutes petites plantes qui adorent l'humidité, toutes minuscules, qui poussent un peu partout sur les murets, entre les pavés, sur l'écorce des arbres. Elles sont d'une diversité extravagante. La préférée de la

tourbière, c'est la sphaigne. Elle a une croissance lente, régulière, et s'étend sur de grandes surfaces. Elle est hyper classe : elle dégage des composés tellement acides que pratiquement personne ne peut la décomposer !



Elle est naturellement IMPUTRESCIBLE. Elle ne peut pas pourrir, quoi ! C'est un peu la momie de la tourbière. Les bactéries n'aiment pas la sphaigne. C'est grâce à elle que la tourbière reste active. Il en existe plus de 35 espèces différentes en France ! Ce qui est génial, c'est que les mousses mortes gardent tout leur pouvoir absorbant, ce qui permet le stockage de l'eau : que demande le peuple ! Mais il n'y a pas que les sphaignes, il y a beaucoup d'autres plantes, tout un grand cortège. La plupart que l'on ne trouvera que dans les tourbières, tant les conditions y sont particulières. Toutes ces plantes vont faire des petits groupes, en fonction de leurs affinités, si elles sont copines ou pas, et puis selon leurs passions communes : il y en a qui préfèrent l'acidité, comme la sphaigne, et d'autres qui préfèrent les terrains alcalins (ou basiques, c'est l'inverse d'acide).

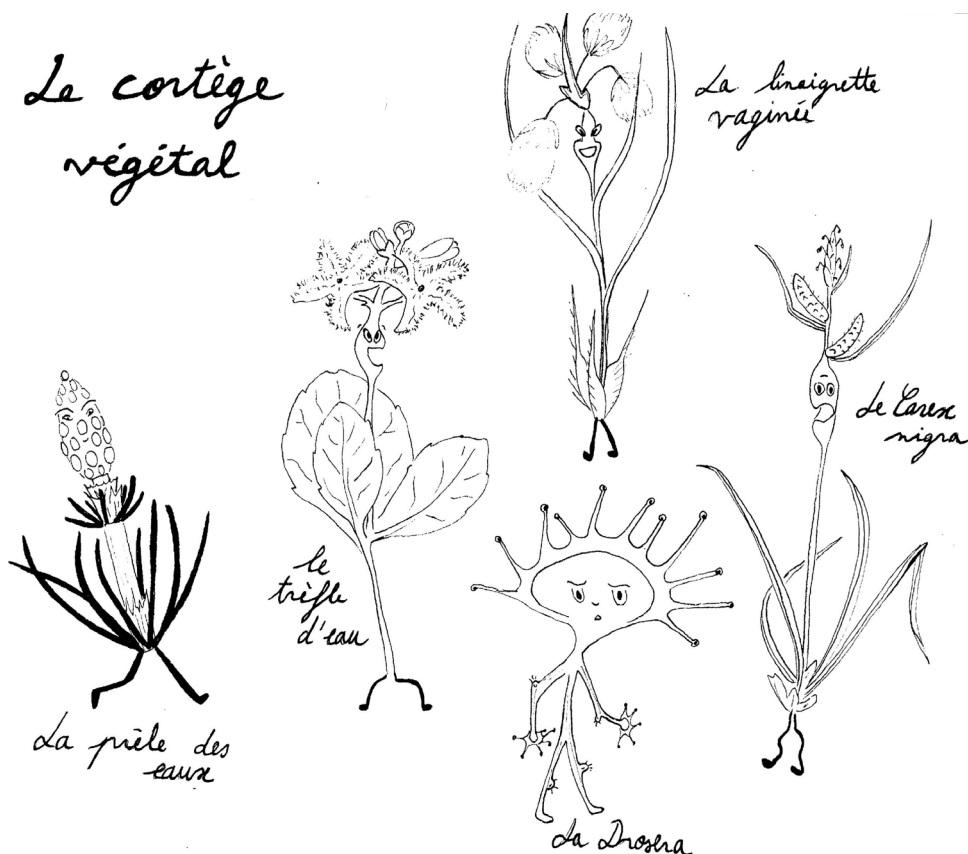


On trouve, sur certaines tourbières, des plantes qui n'aiment pas trop l'eau. Pour ne pas noyer leurs racines, elles forment des « touradons ». Ce sont des touffes en relief, des mottes de plantes qui vont s'élever au-dessus du tapis de sphaigne pour pouvoir respirer.

BEN ALORS, LES PLANTES DE LA TOURBIERE, TU NOUS LES PRESENTES ?

Drosera, votre guide, est une plante carnivore ! Elle possède une substance collante sur ses feuilles, qui lui permet de piéger les insectes pour s'en délecter. Et voici quelques autres espèces qui poussent sur les tourbières...

Le cortège végétal



Mais il n'y a pas que des plantes sur la tourbière : il y a aussi des serpents, des lézards, des oiseaux, des insectes... Une biodiversité resplendissante. Bon, clairement, on ne va pas se mentir, il existe vraiment beaucoup de types de tourbières. Chacun a son cortège végétal favori, qui est influencé

par la nature de la roche qui se trouve sous la tourbière : les tourbières alcalines se trouvent sur des roches basiques (par exemple, le calcaire) et les tourbières acides sur des roches siliceuses (par exemple, le granit, le gneiss ou le grès). Mais revenons-en à nos tourbons.

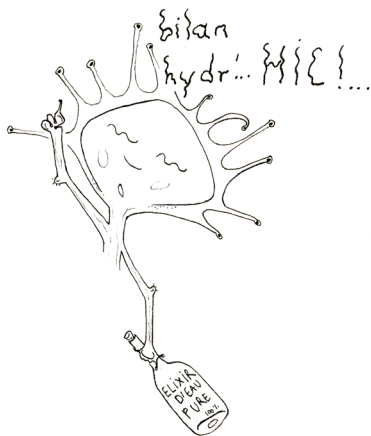


ELLE SE FORME COMMENT LA TOURBIERE ?

On sait maintenant que le milieu doit être gorgé d'eau tout le temps. Et si parfois tu as l'impression que ta tourbière est toute sèche, c'est parce que l'eau se cache : elle est enfouie sous quelques centimètres de tourbe : on est sur un énorme tapis flottant, un radeau de mousses. Il y a donc une condition SINE QUANON.

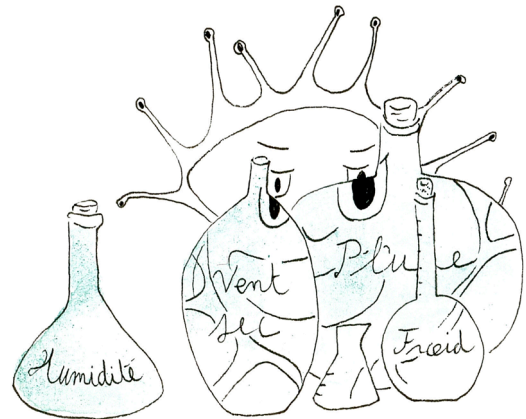


Oui bon, une condition indispensable, une condition inconditionnelle : il faut un bilan hydrique positif.



Ce n'est pas compliqué (en théorie) : les apports d'eau doivent être égaux ou supérieurs aux pertes d'eau. Les apports, c'est la pluie, la neige, le brouillard, le ruissellement, ou même l'eau qui provient des nappes phréatiques (phréatique, c'est un mot compliqué qui veut dire pas très profond dans le sol, comme un puits). Les pertes, c'est l'évapotranspiration (la transpiration du sol ou des plantes) ou les écoulements d'eau latéraux (par les rivières, les ruisseaux) ou verticaux (selon l'étanchéité du sol). Ce bilan, il est

conditionné par la pluviométrie : combien il pleut et quand. La température, elle, influence l'évapotranspiration.

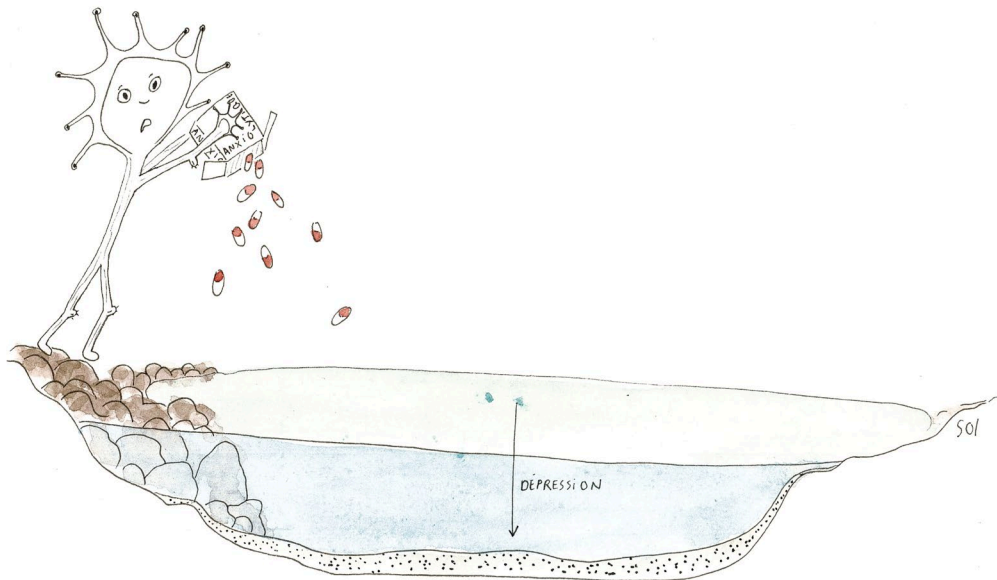


L'évapotranspiration, c'est l'eau qui s'évapore du sol et des plantes. Par exemple, s'il fait trop sec, il n'y aura pas assez d'eau. S'il fait trop chaud, il y aura trop d'évapotranspiration. Et s'il fait trop froid, il n'y aura pas assez de matière organique, parce que les plantes ont plus de mal à se développer dans le froid. Donc, voilà, il faut un savant mélange de tout ça, bien dosé !

Le climat le plus favorable, c'est beaucoup de pluie, avec des températures assez basses. Mais si seulement, c'était aussi simple que ça... Il existe aussi des tourbières dans des climats chauds, sous les tropiques !

BON ASSEZ PARLE CLIMAT, PARLONS CAILLOUX ! PARLONS SUBSTRAT !

A chaque endroit, son avantage, ou son désavantage. Le climat ne lui suffit pas, la tourbière est exigeante. Il lui faut une topographie (mais si, rappelle-toi, on en parlait tout à l'heure, les creux, les bosses, toussa toussa...) spécifique. Une dépression du sol par exemple, dans laquelle l'eau s'accumule. Ou une très faible pente, qui ralentit son écoulement.

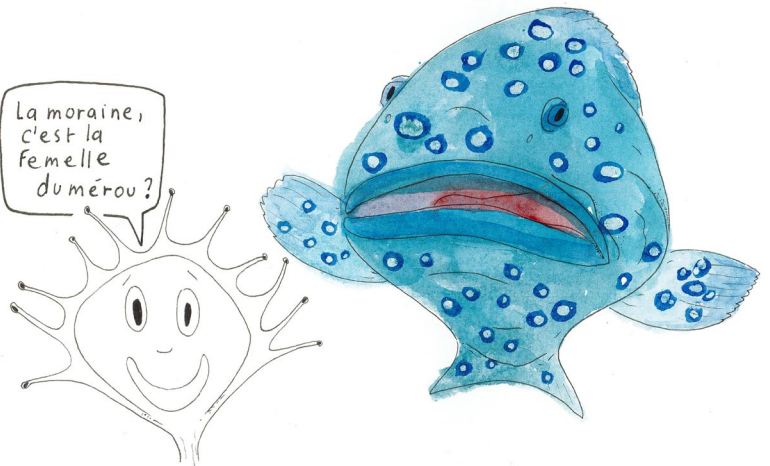


Et puis, comme on disait, la perméabilité du sol : est-ce qu'il retient l'eau ? C'est la nature du substratum géologique qui compte, en fait. Les caractéristiques chimiques qui en découlent feront le tri parmi les bactéries, champignons et tous les microorganismes qui décomposent les débris végétaux, pour permettre à la tourbe de s'accumuler !

Tout à l'heure, on parlait de la lenteur de la tourbière. Elle grossit lentement, gagne chaque année moins d'1 mm d'épaisseur. Rien du tout, en fait. Alors qu'elle peut faire jusqu'à 10 m de profondeur... Tu imagines l'âge que ça lui donne ? Des milliers d'années. Les tourbières du sud de l'Europe ont commencé à se former il y a environ 20 000 ans. Imagine à cette époque, des plaines couvertes de steppes, et des vallées envahies par les glaciers, avec des montagnes qui émergent. C'est la dernière glaciation qu'a connu la Terre. Le climat a commencé à se réchauffer il y a 18 000 ans. Doucement, les glaciers se sont retirés. En remontant vers les montagnes, ils ont laissé derrière eux des moraines.



La moraine, c'est la femelle du mérou ?



Mais non, enfin ! Les moraines, ce sont des gros tas de cailloux, des roches, quoi ! Râclées et écrabouillées par le glacier sur son passage. A certains endroits, elles ont formé des barrages, et piouf, des lacs de montagne se sont installés ! Bon nombre de ces lacs ont été peu à peu envahis par les plantes. Et cela a formé de belles tourbières.

L'HISTOIRE D'UNE TOURBIERE

Je vais vous raconter l'histoire d'un type de tourbière que l'on trouve en moyenne montagne, et qu'on appelle lac-tourbière (ou tourbière limnogène dans le charabia des pros de la tourbière).

Un beau jour, le sol entre en dépression... Une ride se creuse ! Ou plutôt une fossette, car elle a la forme d'une cuvette. L'eau, toujours attirée par tout ce qui aura le beau potentiel de la contenir, s'y précipite. Elle forme un plan d'eau.

Ensuite, un escadron de petites plantes pionnières déjà présentes sur les berges, se met à former des radeaux à différents endroits du plan d'eau, de plus en plus de radeaux...

Le plan d'eau libre est alors envahi de toutes parts, sa surface est progressivement recouverte, et sa contenance comblée de matière organique, jusqu'à disparaître sous un tapis de sphaignes et d'autres plantes copines, qui continuent tranquillement (mais sûrement) de croître. Elles bombent la tourbière.

C'est une très longue histoire, que je raconte très vite. Certaines tourbières sont encore en formation. Il leur faut des milliers d'années pour se constituer.

C'est même plutôt extraordinaire. La tourbe s'accumule, elle fait des couches qui s'empilent les unes sur les autres. La plus ancienne des couches, qu'on appellera la vieille couche, est tout en bas, au fond de la tourbière. La plus jeune, tout en haut : juste en dessous des sphaignes de la surface. L'accumulation est plutôt régulière, sauf si la tourbière est inactive pendant une certaine durée, parce qu'il fait trop sec par exemple. En théorie, sans perturbation extérieure ou bouleversement, on peut donc dater chaque couche ! Une des méthodes utilisées pour

dater, c'est d'analyser la quantité de carbone radioactif naturellement présent dans la matière organique. Ce taux de carbone permet de dater le début de l'accumulation de tourbe : pour la tourbière des Nassettes, au Mont Lozère, c'était il y a plus de 13 000 ans.

LA TOURBE, UNE ARCHIVE HISTORIQUE TRES CONVOITEE

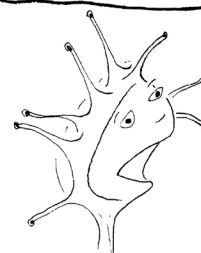
En fait, si je te bassine avec ces histoires de tourbe et de sphaignes qui font des couches, ce n'est pas pour rien.

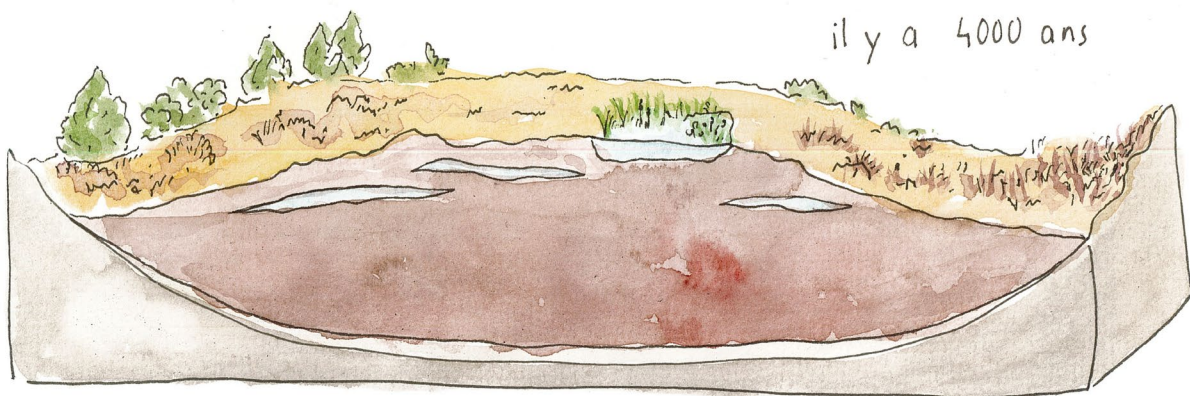
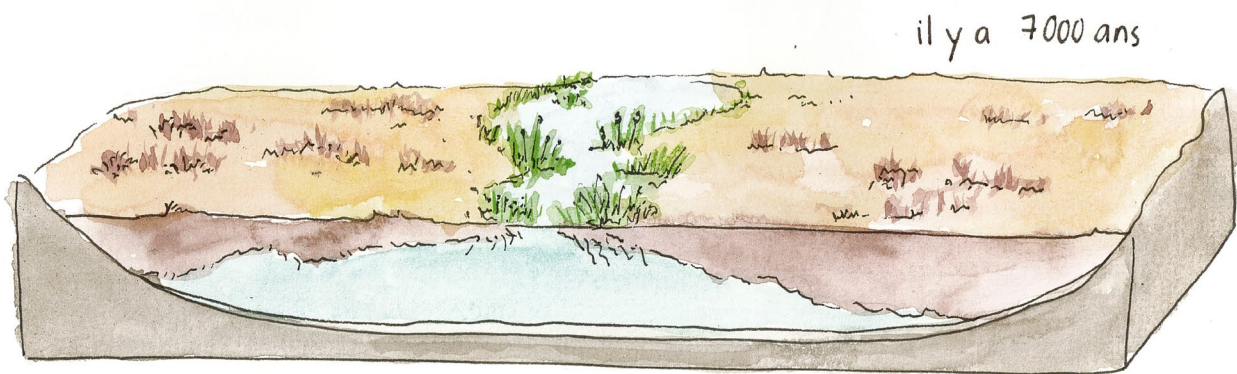
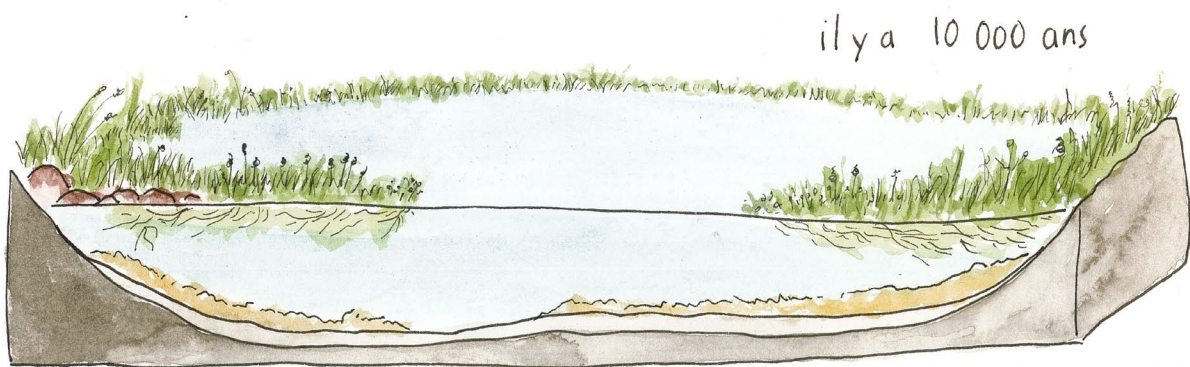
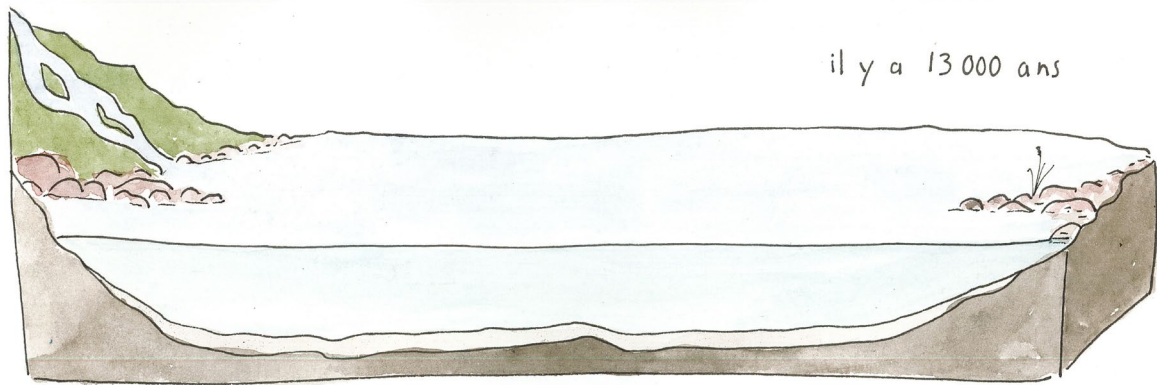
La tourbe
ça fait des couches
comme les oignons.



La tourbière, grâce aux conditions particulières anaérobies (tu te rappelles ?), peut conserver tout plein de choses assez fascinantes... Parfois, dans une couche, on retrouve des morceaux de végétaux, qu'on appelle les macrorestes. Macro parce qu'ils sont assez gros, et restes... et bien parce qu'ils restent. On les identifie, on les associe à une plante, et on peut dire :

alors là,
à telle date
il y avait
telle plante
qui poussait
sur la tourbière.





C'est intéressant parce que le cortège végétal de la tourbière (sa team de plantes, quoi) évolue et change en permanence, en fonction des conditions environnementales. Le macroreste, c'est une sorte de fossile de fragment d'une plante. Les plantes sont aussi exigeantes que la tourbière : elles ont leurs conditions favorites. Si on détermine leur présence à une certaine date, on peut même faire des déductions sur le climat local de la tourbière à cette époque-là !

Et là, c'est parti pour des déductions qui n'en finissent plus ! C'est le travail des paléoécologues. Ils extirpent des informations enregistrées par les milieux naturels, les isolent et en déduisent l'histoire des environnements passés, de la végétation par exemple.

On peut aussi trouver des charbons dans la tourbe. Parfois, ils sont gros (on parle de macrocharbons) et on peut les identifier. Parfois, ce sont de petites cendres (microcharbons), qui ont été transportées par

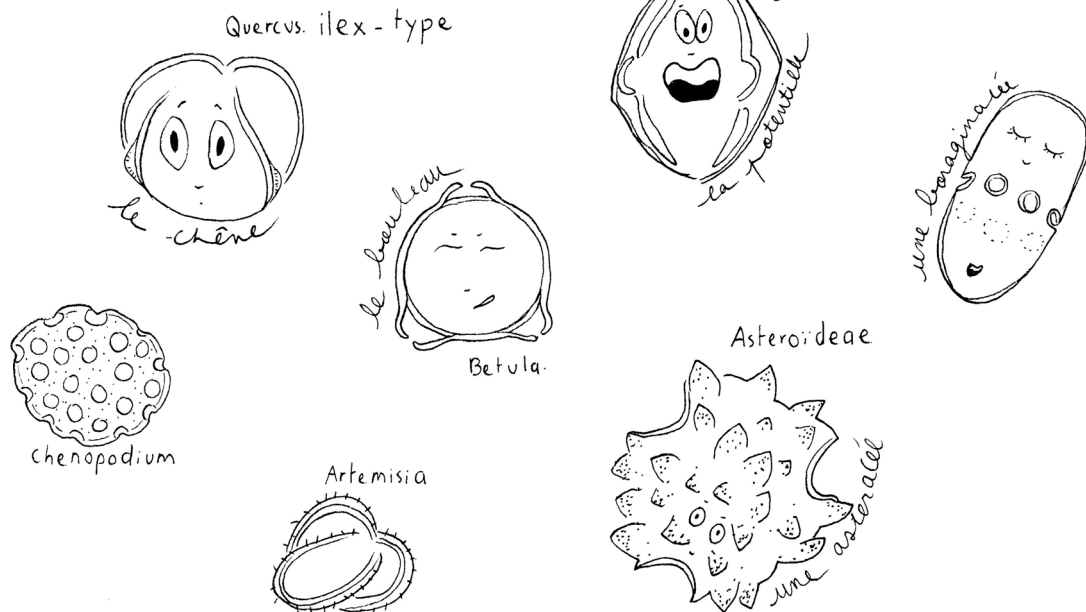
le vent pendant un incendie, puis piégées dans la tourbe après s'être déposées à la surface de la tourbière. Ces cendres, par leur quantité et leur taille, racontent l'histoire des feux autour de la tourbière.

La plupart de ces éléments sont très petits, et pourtant si précieux. Ils regorgent d'informations sur l'évolution de l'environnement, sur les cortèges de plantes, sur la présence d'êtres humains, sur leur impact sur le milieu...

LE TRESOR DES TOURBIERES

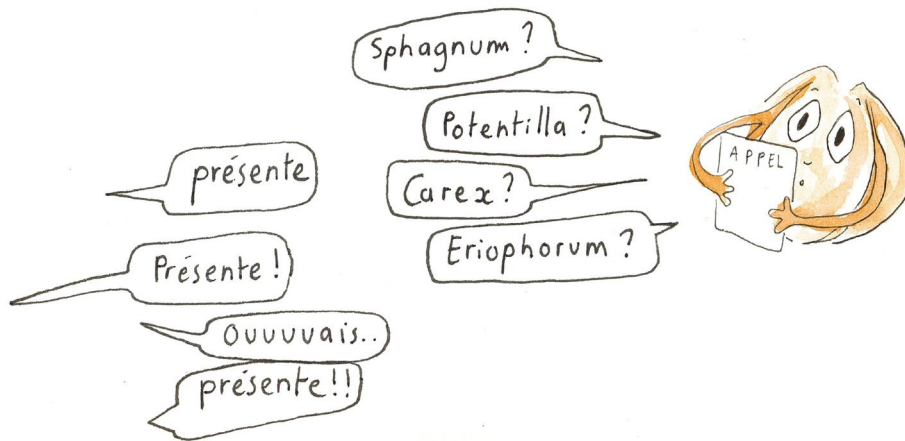
Il y a une petite chose, minuscule, touuuute petite dont je voudrais aussi te parler. Certain.e.s en ont les pattes couvertes dès le printemps, tandis que d'autres éternuent à sa rencontre... Il s'agit d'un élément essentiel dans la reproduction des plantes, et pourtant microscopique, si petit qu'il est presque impossible de l'observer à l'œil nu. Tu ne vois pas ? Même pas une toute petite idée ?

Le Pollen

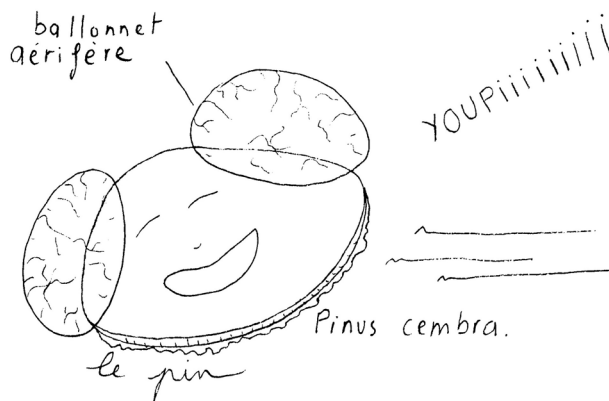


C'est le grain de pollen. Le pollen ! Il est très spécial. Grâce à lui, on peut reconstituer la végétation du passé, avec une finesse incomparable. A lui seul, il raconte l'histoire

des plantes de la tourbière, mais aussi de celles qui poussent autour, et parfois même, l'histoire des plantes de toute la région ! Il peut nous dire qui était là, qui ne l'était pas.



L'originalité des formes qu'il peut prendre est telle qu'il est possible d'associer chaque pollen à ce que l'on appelle un taxon. Un taxon, c'est un groupe d'êtres vivants qui ont des liens de parenté, et donc des caractères en commun. On distingue des familles, des genres, des espèces... Parfois, on peut identifier une espèce à partir d'un grain de pollen, mais c'est rare. C'est rare, parce que ce qui différencie les grains de pollen, ce sont des motifs, des caractères spécifiques et nombreux, que l'on ne peut pas observer à l'œil nu: il faut un microscope. Une multitude de formes, parfois rigolotes. Comme celle du pollen de Pin, qui présente ce qu'on appelle des ballonnets aérifères.



Ce sont comme des petites bulles de part et d'autre, qui permettent au grain de pollen d'être transporté par le vent sur de très grandes distances! Un peu comme une montgolfière. Toutes les plantes à fleurs produisent du pollen. A chacune son pollen, pour ainsi dire! Avec toutes les plantes identifiées à partir du pollen dans chaque

couche de tourbe, on peut se faire une idée de la composition de la végétation. Quelles plantes il y avait à une certaine période, en quelle abondance... On comprend beaucoup de choses, comme par exemple, l'influence des populations humaines sur les paysages.

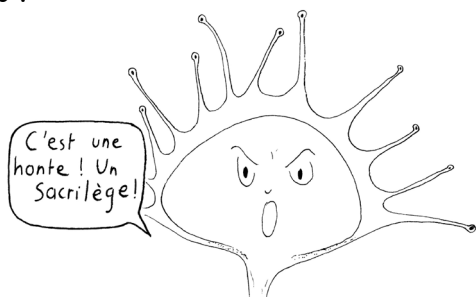
LA TOURBE, UN MATERIAU TRES PRISE

La tourbière, comme tu peux le constater, est précieuse pour les personnes qui étudient les environnements passés. Les perturbations liées à l'exploitation de la tourbe, ou encore à la présence de troupeaux qui remuent et mélangent les différentes couches, peuvent détruire toutes ces informations. C'est comme si on mélangeait toutes les pages d'un livre qui n'existe qu'en un seul exemplaire, et dont la lecture nous permet de comprendre l'impact qu'on peut avoir sur notre environnement, afin d'en tirer des enseignements sur la gestion future des paysages et milieux qui nous entourent...

Pourtant, les tourbières ont longtemps été exploitées à travers le monde, et le sont encore dans de nombreuses contrées. On utilise la tourbe, une fois séchée, comme combustible pour le chauffage, dans les centrales thermiques par exemple,

La tourbe, riche en nutriments, pauvre en microorganismes et à fort pouvoir absorbant, est également très prisée dans la fabrication du terreau... Tu sais, le terreau, ce grand sac plein de terre tout droit sorti de la jardinerie, que tu utilises pour tes plantes ou dans ton jardin. Je t'invite donc à jeter un œil à sa composition! La tourbe est ainsi très utilisée

en horticulture ou encore pour le maraîchage. On en met même dans certaines couches pour bébé !



DE L'IMPORTANCE DES TOURBIÈRES DANS LE FONCTIONNEMENT DU VIVANT

Les tourbières régressent à l'échelle du globe. Dans les pays nordiques, elles sont ou ont été exploitées. Au sud de l'Europe, beaucoup ont été asséchées, pour y planter des peupliers ou y faire du maraîchage. Pourtant, elles sont d'une importance capitale ! La biodiversité qu'elles abritent est si spécifique, que leur déclin entraîne celui de tous les êtres vivants qui leur sont inféodés. On l'a bien vu, les conditions de vie des tourbières sont si extrêmes et originales, que bon nombre de ses habitants ne peuvent vivre nulle part ailleurs. Ils sont d'ailleurs nombreux à être rares et menacés... On comprend donc l'importance de protéger les tourbières.

De plus, les tourbières sont de grands réservoirs d'eau douce, un élément essentiel à tous les êtres vivants qui peuplent notre planète. Elles sont même des purificatrices de l'eau (et même de l'air !). Elles filtrent l'eau de tous les éléments nocifs qu'elle peut contenir. C'est essentiel, si on veut avoir de l'eau potable. Les tourbières nous rendent beaucoup de services finalement, qu'on a tendance à ignorer...

Elles participent ainsi au cycle de l'eau. L'eau est un élément transitant, tu sais, et les tourbières ont une grande capacité de stockage. Elles peuvent donc approvisionner les nappes phréatiques et les rivières, ou au contraire éponger l'eau lors d'inondations ou de crues.

Elles stockent enfin beaucoup de carbone, un des principaux composants de la matière organique. Cela permet de réduire la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, ces gaz qui réchauffent la surface de notre planète. Et puis, elles sont même capables d'influencer le climat local...

REFERENCES

- Anonyme (2010). *Tourbières des montagnes françaises : Nouveaux éléments de connaissance, de réflexion & de gestion*. Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels & le Pôle-Relais tourbières, 187 p.
- Anonyme (2013). *Voyage au pays des tourbières*. Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels & le Pôle-Relais tourbières, 63 p.
- Anonyme (2015). *Ils ont fait de la pédagogie autour des tourbières de Franche-Comté : Recueil d'expériences pédagogiques*. Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels & le Pôle-Relais tourbières, 65 p.
- Manneville O., Vergne V., Villepoux O. & le Groupe d'études des tourbières (2006). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse, Belgique, Luxembourg*. Delachaux & Niestlé, Paris, 320 p.
- Vauconsant P. (1997). Tourbières, Plantes carnivores. *La Garance Voyageuse : Revue du monde végétal*, 41 : 1-61.

SITES INTERNET

- Peatland Ecology Research Group (2009). <https://www.gret-perg.ulaval.ca>
- Pôle-Relais tourbières (2020). <https://www.pole-tourbieres.org>

DYNAMIQUE D'ACCUMULATION DE TOURBE DANS LE SUD DU MASSIF CENTRAL : FOCUS SUR LA TOURBIERE DU PESCHIO (MONT LOZERE)

Léa d'Oliveira ¹, Alexandra Zitouni ²

*Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (UMR 5554)
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France*

¹ lea.doliveira@etu.umontpellier.fr, ² alexandra.zitouni@etu.umontpellier.fr

Encadrement : Laurent Bremond et Serge Muller

Citation : D'Oliveira L. & Zitouni A. (2021). Dynamique d'accumulation de tourbe dans le sud du Massif Central : focus sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 21-36.

Résumé : L'étude sédimentologique et stratigraphique permet de reconstituer les conditions de mise en place, d'accumulation et d'évolution de la tourbière du Peschio. La stratigraphie, associée à la mesure du degré d'humification et à la teneur en minéraux et matière organique, révèle différents événements enregistrés dans la tourbe. Les mesures réalisées sur la carotte PES-01 montrent une stratigraphie homogène, qui suggère que la tourbière n'a pas évolué depuis plusieurs milliers d'années au-delà du stade de fen. Les résultats présentés montrent par ailleurs l'enregistrement, dans la séquence tourbeuse, du Petit Âge Glaciaire et de l'anthropisation de la région.

Mots clés : sédimentologie, stratigraphie, humification, PAF, TAS

Abstract: *Peat accumulation dynamics in the southern Massif Central: focus on Peschio fen (Mont Lozère).* The sedimentological and stratigraphical study highlights the conditions of establishment, accumulation, and evolution of the Peschio fen. The stratigraphy, coupled with humicity degree and mineral content, reveals different events recorded by the peat. Measurements made on the PES-01 core sediments show a homogeneous stratigraphy, which suggests that the fen has not evolved for several thousand years beyond the fen stage. The presented results finally show the Little Ice Age and the regional anthropisation recorded by the Peschio peaty sequence.

Keywords: sedimentology, stratigraphy, humification, LOI, SAR

Les tourbières, qui recouvrent 3 à 4% de la surface terrestre (Clymo, 1991), sont des écosystèmes qui représentent des réservoirs très importants de biodiversité, de carbone et d'eau (Gorham, 1991). Du fait de leurs conditions anaérobies, les tourbières permettent une bonne conservation de la matière organique (Moore, 1998). Elles sont donc de puissantes archives permettant de comprendre l'histoire humaine et

environnementale (Aaby, 1976 ; Castro et al., 2015). Plusieurs approches sont aujourd'hui utilisées pour permettre la reconstruction des paléoenvironnements au sein des tourbières : les analyses polliniques, l'étude des palynomorphes non-polliniques (PNP), l'anthracologie et la sédimentologie (Chambers et al., 2012). L'aspect sédimentologique, lors d'une reconstruction paléoenvironnementale, aborde les conditions de mise en place et d'accumulation de la tourbe au

travers de la composition et de l'assemblage des restes végétaux, du degré de décomposition de la matière et de son taux d'accumulation sédimentaire (Muller et al., 2002). Ces processus sont étroitement liés aux conditions climatiques et environnementales d'une région (Gorham, 1991 ; Halsey et al., 1998 ; Anderson et al., 2003). Leurs analyses apportent donc des indices essentiels permettant de reconstruire les flores et climats passés.

L'influence du climat et de l'anthropisation sur le développement des tourbières a été mis en avant à de nombreuses reprises (Aaby, 1976 ; Cubizolle et al., 2015). Ce sont des écosystèmes humides largement dépendants des précipitations ou de l'hydrologie interne (Moore, 1988). Les bogs (ou tourbières ombrotrophes) sont des systèmes essentiellement alimentés par des eaux météoriques (Wu & Roulet, 2014). Les fens (ou tourbières minérotrophes) sont au contraire influencés par un drainage à écoulement continu, où l'eau provient du système hydrographique et fournit à la communauté végétale un ensemble d'éléments minéraux en fonction de la lithologie du bassin (Manneville, 2006). La tourbière du Peschio, près du Mont Lozère dans le Massif Central, est un exemple de fen dont la sédimentologie n'a encore, à notre connaissance, jamais fait l'objet de recherches. Malgré leur intérêt paléoenvironnemental, historique et archéologique, les tourbières du Massif Central sont restées, jusqu'à récemment et comme beaucoup d'autres en zones tempérées, relativement peu étudiées (Cubizolle et al., 2015).

Cette étude vise à déterminer les conditions de mise en place et d'évolution de la tourbière du Peschio au cours du temps, et plus largement à reconstituer les paléoenvironnements de la région, le tout à travers l'étude des enregistrements climatiques et anthropiques. Nos résultats viendront compléter ceux des autres proxies étudiés lors de cette campagne ORPAM 2021 et permettront de mieux comprendre les réponses de la tourbière aux variations climatiques ainsi que documenter de manière plus précise l'occupation humaine de la région.

LA DYNAMIQUE DE L'ACCUMULATION DE LA TOURBE : ETAT DES CONNAISSANCES ET CONDITIONS D'ACCUMULATION DE TOURBE DANS LE SUD DU MASSIF CENTRAL

1- Mécanismes de l'accumulation de la tourbe

Les tourbières sont un stade avancé de la succession hydrosérale (Muller, 2002). Cette succession écologique se développe à partir d'un milieu lacustre et tend vers une fermeture et un assèchement de celui-ci. Les différents stades théoriques sont successivement : plan d'eau douce (dépôt d'argile, de craie ou de gyttja), marais (dépôt minéral), puis fen et bog (dépôt tourbeux). La formation d'une tourbière dépend d'un excès de productivité végétale locale par rapport aux processus respiratoires des organismes (Moore, 1989 ; Julve, 1996). Dans une tourbière, la production végétale est disponible comme ressource alimentaire pour les animaux ou tombe en tant que litière au sol, où elle est attaquée par des animaux détritvores et décomposée par les composants microbiens et fongiques de l'écosystème (Clymo, 1984 ; Moore, 1987). L'accumulation de la tourbe au cours du temps a lieu lorsque le taux de décomposition est inférieur au taux de production de matière organique (Moore, 1989).

Les différences d'efficacité de la décomposition de la matière organique permettent de diviser le profil vertical d'une tourbière en deux zones (Fig. 1) : une zone supérieure (ou acrotelme), où l'engorgement est intermittent en fonction de la saison et de l'apport en eau par le bassin versant, et une zone inférieure (ou catotelme), anaérobie, qui est gorgée d'eau en permanence (Moore, 1989). La limite entre ces deux régions n'est pas constante dans le temps : elle dépend de plusieurs facteurs comme la saison ou les variations climatiques (Moore, 1987). La décomposition microbienne anaérobie se produit très lentement, surtout dans les couches profondes et saturées (Moore, 1987). En fonction du taux d'accumulation de la

tourbe et de son engorgement, les structures végétales qui tombent à la surface de la tourbe peuvent passer un temps considérable dans l'acrotelme avant de passer dans le catotelme (Moore, 1987). Une fois dans la zone anaérobie, le taux de décomposition diminue sévèrement, permettant la conservation des tissus végétaux résiduels (Moore, 1987). La décomposition suit un processus d'humification (transformation partielle en substances humiques), qui s'accompagne d'une faible minéralisation (Wastiaux, 2008). La teneur en matière organique reste donc toujours proche de 100% du poids sec, en raison de la très faible minéralisation (Wastiaux, 2008). Le long du profil d'une tourbière, le degré d'humification a naturellement tendance à augmenter de la surface vers la base de la tourbière, en raison de l'accumulation et du passage de l'acrotelme au catotelme (Wastiaux, 2008). Les taux d'accumulation sédimentaire classiquement observés se présentent donc ainsi : une forte accumulation à la base de la tourbière (généralement liée à la présence de matières minérales issues de l'érosion de la roche mère), à la transition sédiment minéral-sédiment organique, une forte baisse du taux d'accumulation (la matière organique ancienne étant fortement décomposée et compressée par le poids de la matière organique sus-jacente) et enfin, le taux d'accumulation augmente à nouveau, la matière organique récente étant peu décomposée et non comprimée (Muller et al., 2019). C'est le schéma observé dans la plupart des tourbières étudiées dans le sud du Massif Central (Muller et al., 2019).

L'hydrologie du site est donc le facteur prédominant de la formation d'une tourbe (Malmer, 2014). L'hydrologie est elle-même affectée par des facteurs climatiques comme les précipitations et l'évaporation, mais aussi par des facteurs locaux, comme la topographie, la couverture végétale, voire l'utilisation des terres du bassin versant (Moore, 1987 ; Malmer, 2014).

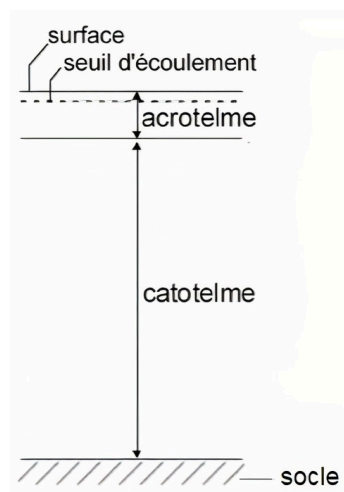


Figure 1. Profil vertical schématique d'une tourbière (d'après Wastiaux, 2008)

2- Contrôles allogènes de l'accumulation de la tourbe

L'accumulation de la tourbe est induite par l'activité respiratoire des organismes de la tourbière et le dépôt de matière organique elle-même sous le contrôle du climat (Gorham, 1991 ; Halsey et al., 1998). Ces contraintes exogènes (climatiques et hydrologiques) appliquées sur l'écosystème de la tourbe doivent être prises en compte pour comprendre la dynamique de l'accumulation d'une tourbière (Gorham, 1991 ; Halsey et al., 1998 ; Anderson et al., 2003).

La température du sol est un facteur majeur pour la décomposition de la matière organique (Domisch et al., 2006). Le réchauffement climatique pourrait accélérer ce processus et affecter l'accumulation de la tourbe (Domisch et al., 2006). Szajdak et al. (2020) avancent que le drainage peut améliorer la décomposition de la matière organique par une meilleure aération de la tourbe à sa surface, augmentant l'activité microbienne.

Les fens et les bogs sont des écosystèmes dans lesquels la nappe phréatique de saison sèche peut se trouver sous la surface de la tourbe (Moore, 1987). La hauteur de nappe n'est pas seulement dépendante des saisons (plus haute en hiver qu'en été pour l'hémisphère Nord), mais elle dépend aussi de

la topographie du bassin (Moore, 1987). En effet, la microtopographie peut être complexe, présentant des crêtes ou des bosses alternant avec des mares ou des canaux étendus, affectant l'apport en eau et en nutriments dans la tourbe (Moore, 1989). Les bogs, quant à eux, dépendent énormément des conditions climatiques (Wu & Roulet, 2014). En effet, les taux de précipitations et d'évaporation sont saisonniers dans beaucoup de régions (zones tempérées, tropicales, boréales) (Ragette & Wotawa, 1998).

3- Conditions d'accumulation dans le sud du Massif Central

Le Massif Central, principalement composé de roches granitiques (acides) (Bal et al., 2015), est particulièrement propice au développement de tourbières minérotrophes : le paysage a été fortement modelé par le travail des glaciers du dernier maximum glaciaire sur la roche mère, créant de nombreuses zones concaves facilitant la turfigenèse (production de la tourbe) (Degorce, 1995). De plus, une pluviométrie importante (1000-1500 mm/an) est observée au-dessus de 1000 m d'altitude permettant l'alimentation des vallons et vallées en tête de réseau hydrographique (Cubizolle et al., 2004).

L'épaisseur des tourbières généralement observée en France est comprise entre 50 cm et plus de 10 m (Cholet et al., 2010). Les tourbières du Massif Central ont une profondeur comprise entre environ 1 et 3 m (Cubizolle et al., 2004 ; Pulido Avila, 2006 ; Decorsiere et al., 2019). Le Sud du Massif Central, fortement influencé par la circulation méditerranéenne (Martin & Didon-Lescot, 2007), est soumis à des conditions favorisant les épisodes cévenols et est caractérisé par des précipitations abondantes à l'automne et une saison sèche l'été (Martin & Didon-Lescot, 2007). Ces conditions de sécheresse entraînent une baisse de la nappe d'eau (Moore, 1987), qui à son tour favorise une forte dégradation de la matière organique, abaissant ainsi le taux d'accumulation de la

tourbière (Szajdak et al., 2020). L'influence du climat méditerranéen pourrait donc expliquer la faible profondeur des tourbières du Massif Central comparée à celles des autres régions montagneuses françaises.

MATERIEL ET METHODES

1- Région et site étudiés

La tourbière du Peschio (44°27'N, 03°38'E ; Fig. 2), est une tourbière minérotrophe localisée sur le Mont Lozère, dans le parc national des Cévennes, au sud-est de Mende. La tourbière du Peschio s'étend sur environ 800 m de longueur et 130 m de largeur. Le fonctionnement de la tourbière a été influencé par la construction d'une digue au Moyen âge, qui a entraîné l'élévation du niveau d'eau dans une tourbière préexistante (Pulido Avila, 2006).

2- Carottage

Une carotte de 3 m (PES-01 ; 44°46'N, 03°63'E) a été extraite de la tourbière. Le carottage a été réalisé à l'aide d'un carottier russe possédant une chambre de carottage de 1 m de longueur. Le carottier russe a pour particularité d'éviter la compaction verticale des sédiments, ce qui permettra de négliger les erreurs liées à ce phénomène lors de l'analyse des tronçons de la carotte (Jowsey, 1966).

3- Description de la carotte

La description visuelle de la carotte permet de signaler les changements évidents de couleur et de texture de la tourbe, ainsi que la présence d'objets trop volumineux pour être représentés dans nos échantillons issus d'un emporte-pièce d'1 cm³. Ces changements pourront être corrélés ultérieurement aux variations de décomposition de la matière végétale et à la variation de composition de la tourbe (Aaby, 1986).

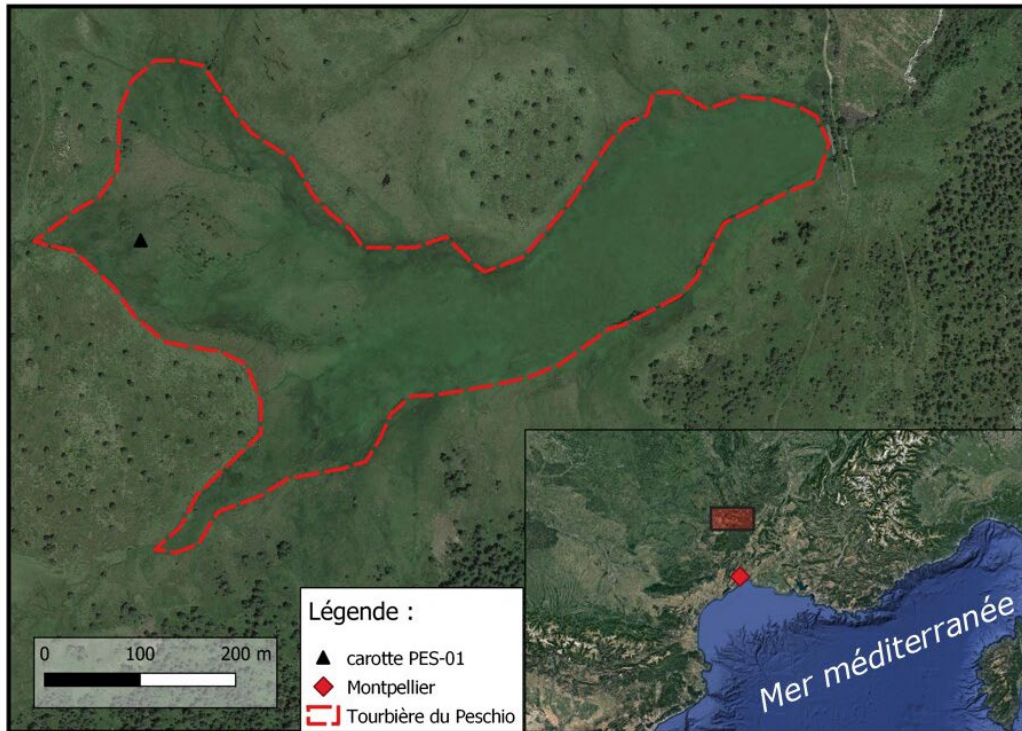


Figure 2. Localisation de la Tourbière du Peschio et du site de carottage PES-01

4- Perte au feu

Pour donner une indication sur les proportions de matière organique et de carbone contenues dans la carotte PES-01, les teneurs en matière organique et en carbonates ont respectivement été mesurées par perte au feu à 550 et 950°C (Ball, 1964). Pour cette étude, 31 échantillons de 1 cm³ ont été prélevés tous les 10 cm. La pesée de chaque échantillon après un séchage de 12h à 150°C (noté P150) a été réalisée. Pour déterminer la teneur en eau du sédiment (% de la masse de l'eau contenu dans l'échantillon), un indice d'humidité (noté Th) a été calculé sur la base de l'équation suivante :

$$T_h = \frac{P - P_{150}}{P - P_{tare}} \times 100$$

avec : P_{tare}, la masse du creuset vide (g) ; P, la masse de l'échantillon avant séchage (g) et P₁₅₀, la masse de l'échantillon après séchage (g).

Ensuite, une première calcination à 550°C pendant 5 h a été réalisée pour estimer la

teneur en matière organique (% de la masse sèche). Comme pour l'étape antérieure, la pesée des échantillons après la calcination (noté P₅₅₀) a été faite. La teneur en matière organique, notée PAF₅₅₀, est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$PAF_{550} = \frac{P_{150} - P_{550}}{P_{150} - P_{tare}} \times 100$$

avec : P₁₅₀, la masse de l'échantillon après séchage (g) ; P₅₅₀, la masse de l'échantillon après calcination à 550°C (g) et P_{tare}, la masse du creuset vide (g).

Enfin, une dernière calcination de 2h à 950°C a été réalisée. A la suite de la dernière calcination une nouvelle pesée est réalisée (noté P₉₅₀), permettant cette fois-ci de donner une indication sur la teneur en carbone non organique de l'échantillon, noté PAF₉₅₀.

$$PAF_{950} = \frac{P_{550} - P_{950}}{P_{150} - P_{tare}} \times 100$$

avec : P₅₅₀, la masse de l'échantillon après

calcination à 550°C (g) ; P950, la masse de l'échantillon après calcination à 950°C (g) et Ptare, la masse du creuset vide (g).

A partir des teneurs en matière organique, la teneur en minéraux peut être estimée (Chambers et al., 2021). Cette teneur correspond à 1-P550 (en%).

Afin de caractériser l'évolution de la composition de la tourbière au cours du temps, il est nécessaire d'estimer le taux de décomposition de la matière organique végétale. Pour ce faire, deux protocoles ont été mis en place. D'une part, une application du système de classification de Troels-Smith (1955) et d'autre part, un protocole adapté de Blackford & Chambers (1993) permettant d'estimer le degré d'humification en fonction de la profondeur.

5- Méthode Troels-Smith

Afin de déterminer le type de végétaux présents tout le long de la carotte, la classification de Troels-Smith (Troels-Smith, 1955 ; Aaby & Berglund, 1986) a été utilisée (Annexe 1). Celle-ci permet de décrire la composition de la tourbe, notamment par l'abondance relative de certains types de végétaux et de donner une idée de leur état de décomposition. Le terme « *Substantia humosa* » désigne la matière trop détériorée pour être identifiée à la loupe binoculaire ; « *Turfa* », les débris végétaux les moins dégradés, où l'on distingue encore des bryophytes et des parties aériennes d'herbacés angiospermes ; et « *Detritus* » décrit un stade intermédiaire où l'on ne distingue plus que certaines structures réfractaires, comme les rhizomes et les radicelles. La nature des débris est également précisée : « *Turfa bryophytica* » se réfère aux Bryophytes et « *Turfa herbacea* » ainsi que « *Detritus herbosus* » aux débris herbacés (Troels-Smith, 1955 ; Aaby & Berglund, 1986). Des échantillons de 1 cm³ de tourbe ont été prélevés tous les 8 cm le long de la carotte, soit un total de 38 échantillons. Ceux-ci ont été dilués dans de l'eau distillée, puis est observés à la loupe binoculaire. Chaque type d'élément présent est compté sur la lame et

divisé en 5 classes d'abondance, de 0 à 4 (0 : absence d'éléments, 1 : entre 1-10 éléments, 2 : entre 10-100 éléments, 3 : entre 100-1000 éléments, 4 : > 1000 éléments). La « *Substantia humosa* » a quant à elle été décrite en pourcentage de recouvrement de la lame par rapport aux autres matériaux présents (0 : absence, 1 : 0-25%, 2 : 25-50%, 3 : 50-75%, 4 : 75-100%). La présence d'objets remarquables (graine, débris animal, charbon, etc.) est signalée en commentaire.

6- Estimation du degré d'humification

L'humification traduit l'avancement de la dégradation, c'est-à-dire du procédé de transformation par oxydation de la matière organique en humus (Juma, 1998). Au cours de cette dégradation, la taille des particules organiques tend à diminuer, permettant d'estimer l'avancement relatif du processus en fonction de la profondeur et donc du temps (Aaby & Tauber, 1975). Le principe ici est de diluer les échantillons dans une solution de KOH (Blackford & Chambers, 1993), puis de déterminer la dilution nécessaire pour chacun d'entre eux afin d'atteindre la même transparence que l'échantillon de surface (observation à l'œil nu), qui nous a servi d'étalon. Plus la matière est dégradée, plus l'eau est sombre, et plus il faut la diluer pour obtenir une couleur semblable à l'étalon. Le résultat sera donc une estimation approximative de l'humification avec pour unité un volume d'eau ajouté, ce qui n'est pas comparable à la littérature mais nous permettra d'observer des tendances dans la variation de l'humification le long de notre profil et de les confronter à nos autres observations.

Des prélèvements de 1 cm³ dans la carotte PES-01 ont été effectués tous les 8 cm. Ils ont ensuite été dilués dans une solution de KOH à 10% pour atteindre un volume de 10 ml. Afin de défloculer la matière, c'est-à-dire de dissocier les amas de particules en suspension, le tout a été laissé au bain marie à 80°C pendant 10 min, et remué toutes les 2 min. Chaque échantillon a été tamisé avec une maille de 500 µm afin de garder les macrorestes (graines, racine etc.).

L'échantillon de surface (le moins dégradé) a été dilué dans une éprouvette graduée jusqu'à atteindre 100 ml et utilisé comme étalon. Les échantillons suivants ont été dilués jusqu'à atteindre une turbidité similaire à celle de l'étalon. L'hypothèse de la corrélation entre taux d'humification et turbidité a été émise. La dilution a été notée pour chaque échantillon, ce qui a permis de réaliser un graphique représentant l'évolution du degré relatif d'humification au cours du temps.

7- Taux d'accumulation sédimentaire (ou TAS)

À partir du modèle d'âge de la tourbière du Peschio présenté par Charieau & Larrieu (2021), les taux d'accumulation ont pu être calculés. Le taux d'accumulation sédimentaire (TAS) correspond à une épaisseur de sédiments déposée par unité de temps, ici exprimé en mm/an. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans la compréhension de l'évolution sédimentaire de la tourbière (Loizeau et al., 2012). Les TAS sont calculés à partir de l'équation suivante :

$$TAS = \frac{\text{Profondeur}}{\text{Age}}$$

avec : Profondeur en mm et Age en années.

RESULTATS PRELIMINAIRES

1- Log stratigraphique

La séquence sédimentologique (Fig. 3) montre une tourbe essentiellement composée de *Detritus herbosus*. Entre 250 et 12 cm de profondeur, la carotte se compose exclusivement de *Detritus herbosus* avec des états de décomposition légèrement variables observés grâce aux différentes classes d'abondances de *Substantia humosa* (classes 1 à 3). Une zone sableuse d'environ 1 cm d'épaisseur a été observée à 269 cm de profondeur. Des alternances de tourbe claire et foncée sont par ailleurs visibles le long du profil. Ces alternances de couches sont épaisses de 8 cm à plusieurs dizaines de cm. À l'exception d'une zone claire et homogène d'environ 5 à 133 cm de profondeur, la présence de débris

(rhizomes et radicules) peut être notées dans l'ensemble du profil stratigraphique (de l'ordre de 100-1000 éléments pour chaque observation). À partir de 12 cm et jusqu'à la surface, la tourbe apparaît peu compacte et plutôt claire. Un horizon de *Turfa bryophytica* se distingue entre 8 et 0 cm, où les sédiments sont composés de rhizoïdes et de mousses en majorité (*Turfa bryophytica*), de débris d'herbacés (*Detritus herbosus*) et de *Substantia humosa* en plus faibles proportions (classe 1, entre 1 et 25% de recouvrement de la lame).

Les sédiments situés entre 250 et 300 cm sur la carotte n'ont pas pu être étudiés en raison du confinement lié à l'épidémie de Covid-19.

2- Perte au feu

Les résultats de la PAF (Fig. 4) montrent des taux de carbonates entre 0 et 1,3% et des taux d'humidité n'excédant pas 20%. La teneur en matière organique (MO) varie entre 60 et près de 100% le long de la carotte. La base est moins riche en matière organique. En effet, la teneur en MO augmente (de 65 à 95%) entre 10500 et 7000 cal. BP. La teneur reste plus ou moins constante (85-95%) jusqu'à environ 2000 cal. BP pour ensuite enregistrer une diminution d'environ 35% jusqu'à 1500 cal. BP. À partir de 1500 cal. BP, la teneur en MO augmente fortement jusqu'à atteindre 95%. Entre 700 et 100 cal. BP, une diminution importante est enregistrée, atteignant un minimum de 60% à 300 cal. BP. La teneur en MO augmente ensuite de nouveau pour atteindre un taux de près de 98%. Entre 100 ans cal. BP et l'actuel, une diminution de 10% de MO est enregistrée.

Trois événements d'augmentation en minéraux sont identifiables : entre 10500 et 8500 cal. BP, entre 1900 et 1100 cal. BP, puis entre 700 et 100 cal. BP. Il est important de noter que ces résultats sont à prendre avec précaution, puisqu'en raison du confinement, les erreurs de mesure n'ont pu être ni vérifiées ni corrigées. C'est le cas pour la forte diminution en carbonates observée entre 2000 et 1500 cal. BP, qui ne sera pas prise en compte dans la suite de cette étude.

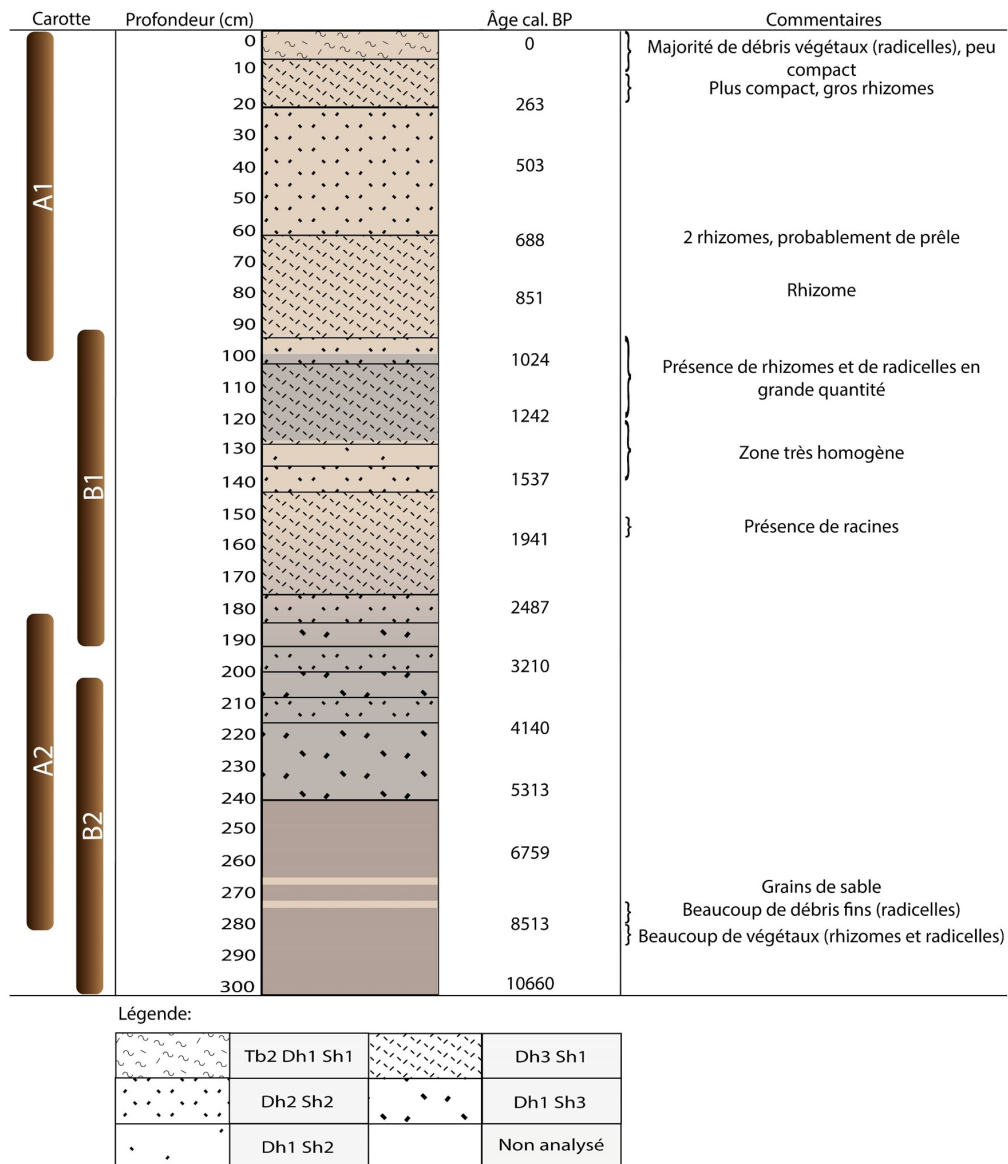


Figure 3. Log stratigraphique de la carotte PES-01 réalisé à partir du protocole et de la classification de Troels-Smith (1955) (Annexe 1): Sh, *Substantia humosa* ; Dh, *Detritus herbosus* ; Tb, *Turfa bryophytica* ; Nombres, abondance relative d'éléments

3- Degré d'humification

La mesure du degré d'humification (Fig. 5) montre que la décomposition n'est pas constante le long de la carotte et qu'elle varie avec la profondeur. Le degré d'humification est maximal à environ 3000 cal. BP, et décroît jusqu'à environ 1000 cal. BP. Cette diminution présente deux dynamiques distinctes. Dans un premier temps, entre 10500 et 2800 cal. BP, la décomposition est

très importante, le volume ajouté étant de l'ordre de 600 ml. Puis, entre 2800 et 1000 cal. BP, il y a une décomposition relativement faible, avec un volume ajouté moyen de seulement 230 ml. On observe une augmentation du volume d'eau ajouté entre 1000 et 400 cal. BP, ce qui montre une augmentation du degré d'humification, puis à nouveau une baisse jusqu'à la surface de la carotte.

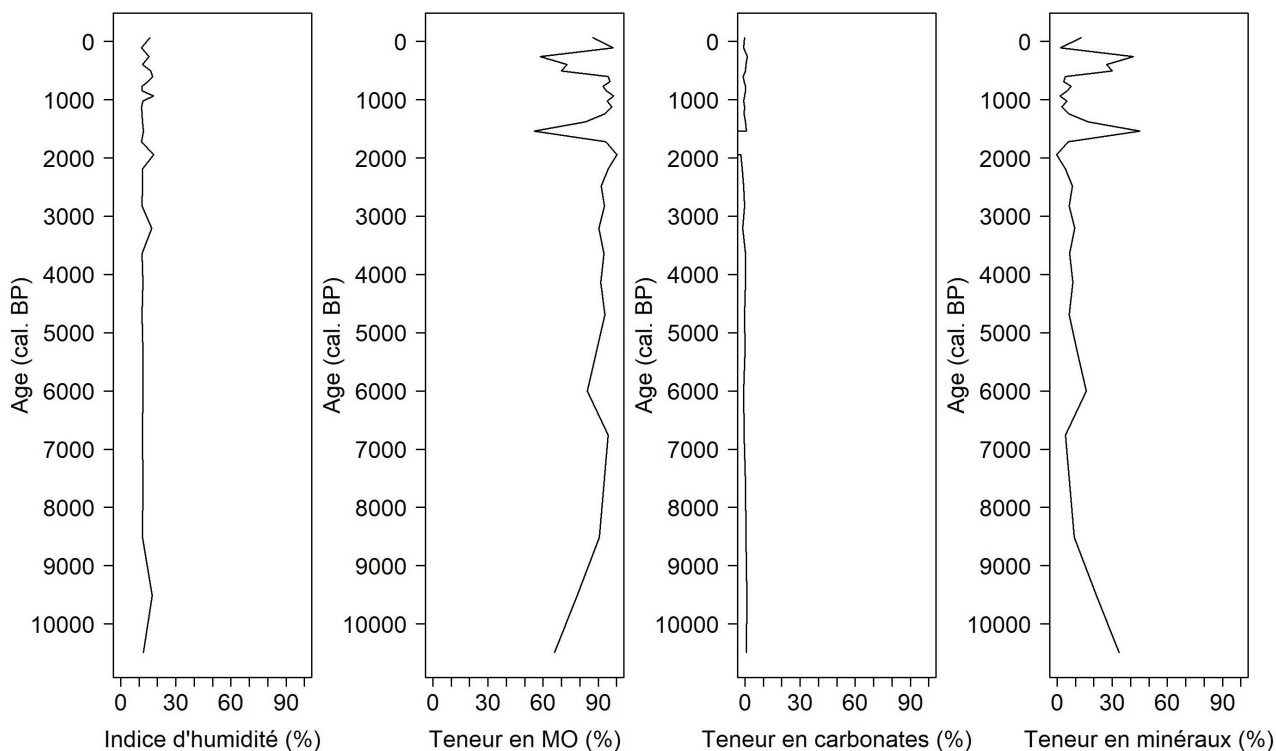


Figure 4. Résultats issus de la perte au feu. De gauche à droite : taux d'humidité en% ; taux de matière organique (MO) en% ; teneur en carbonate en% ; teneur en minéraux en%, (100% - taux de matière organique). Ces taux sont exprimés en fonction de l'âge (cal. BP).

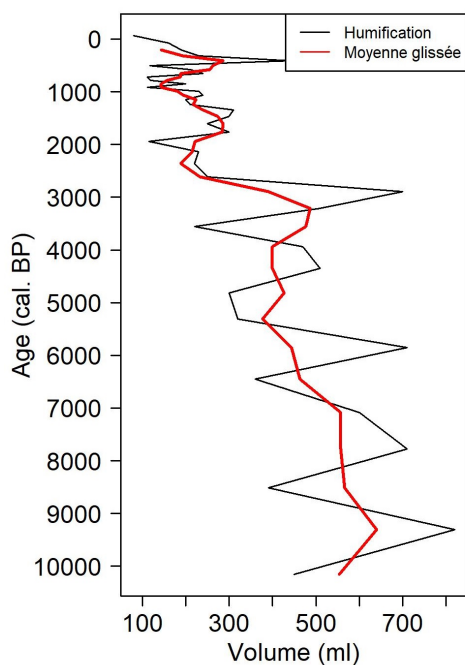


Figure 5. Evolution du degré d'humification en fonction de l'âge (cal. BP).

4- Taux d'accumulation sédimentaire

Le taux d'accumulation (Fig. 6) augmente avec le temps. En effet, entre 10600 (base de la carotte) et 1800 cal. BP, le taux d'accumulation varie entre 0,09 et 0,5 mm/an, puis augmente rapidement entre 1800 et 800 cal. BP, atteignant des taux d'accumulation de l'ordre de 1,2 mm/an en 1000 ans. Depuis 800 cal. BP, le TAS diminue de 1,25 mm/an à 0,05 mm/an.

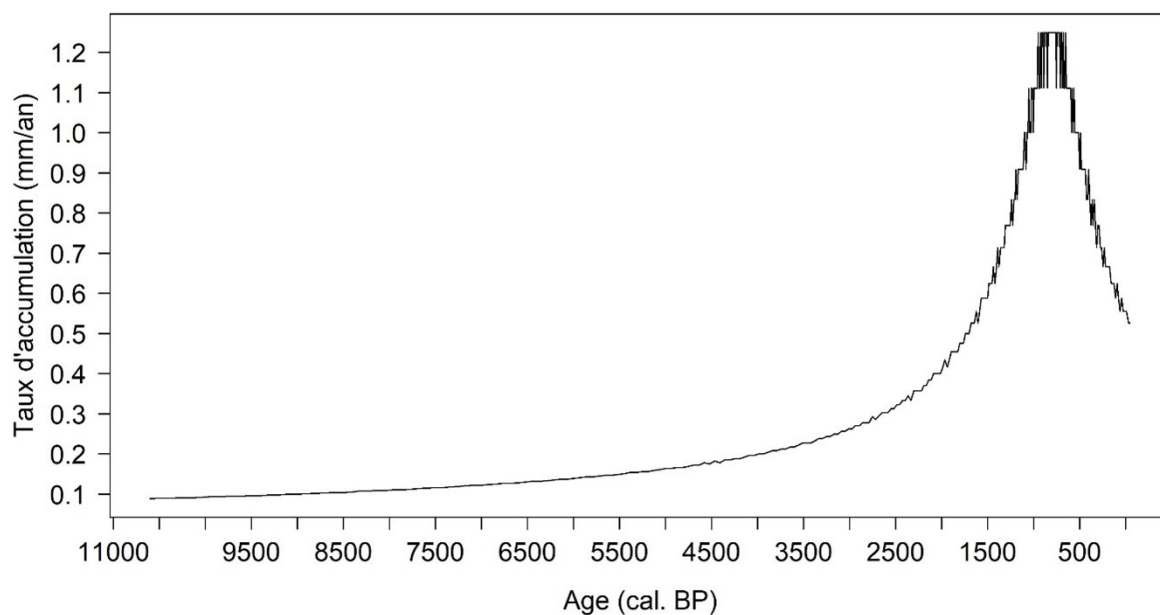


Figure 6. Taux d'accumulation sédimentaire déterminés à partir du modèle d'âge (Charieau & Larrieu, 2021) de la tourbière du Peschio.

DISCUSSION

1-Evolution de la composition de la tourbe de la tourbière du Peschio

Stade hydroséral de la tourbière du Peschio

La PAF à 950°C, qui a révélé une quasi-absence de carbonates confirme le fait que la roche mère de la région est cristalline et acide (Cubizolle et al., 2004). L'abondance réduite de matières minérales traduit un faible apport d'origine détritique. La stratigraphie de PES-01 (*Turfa bryophytica* et *Detritus herbosus*) montre que la tourbière du Peschio a toujours été une tourbière minérotrophe (fen) et, pour cette zone du moins, à dominante herbacée.

La présence de tourbe herbacée, comprenant entre autres des Poaceae, des Cyperaceae et *Sphagnum* (Cartier et al., 2021) tout le long du profil, permet de caractériser la tourbière du Peschio comme un fen (Muller, 2002). Les degrés d'humification variables indiquent quant à eux des conditions humides, avec un niveau hydrostatique élevé (Muller et al., 2003). Les sédiments minéraux à la base de la carotte ont probablement été déposés par le ruisseau de Peschio, avant que la zone occupée par un thalweg soit comblée par la tourbière. Ce schéma de fen succédant à un

écosystème fluviatile est cohérent avec le modèle de la succession hydrosérale (Muller, 2002). La stratigraphie relativement homogène (*Detritus herbosus* et *Turfa bryophytica*) sur les 3 m de carotte n'indique aucune succession de stades hydroséraux au-delà de fen. La tourbière du Peschio stagne donc à ce stade hydroséral depuis plus de 10000 ans. Ce phénomène a déjà pu être observé dans diverses tourbières : c'est le cas de la tourbière de Taurene (Lettonie), où le stade de fen a perduré durant 8000 ans (Kalnina et al., 2014), et de la tourbière de Mirabel (Québec), pour laquelle le stade de fen a duré près de 6000 ans (Muller, 2002). La stagnation au stade de fen s'explique probablement par les conditions climatiques du sud du Massif Central, et notamment par l'existence d'une période estivale sèche, favorable à l'assèchement des couches supérieures des tourbières (Martin et al., 2002). L'accroissement de la décomposition qui en résulte pourrait compenser la production en surface, et entraîner un taux d'accumulation trop faible pour que la surface de la tourbière s'élève suffisamment pour devenir ombrotrophe (Muller, 2002).

Enregistrement de l'activité humaine et du changement climatique de la région par la tourbière du Peschio

L'augmentation rapide du degré d'humification entre la surface et 30 cm de profondeur, suivie d'une nette diminution, sont caractéristiques de l'acrotelme. La zone aérobie favorise la décomposition de la matière organique, ce qui permet l'augmentation de l'humification (Clymo, 1984). La nappe phréatique, séparant l'acrotelme du catotelme crée quant à elle une résistance lors du passage de la matière organique d'une zone à l'autre (Clymo, 1984). Ce processus aboutit à une accumulation de matière humifiée à l'interface acrotelme-catotelme et peut être considéré comme un artéfact puisqu'il ne reflète pas une augmentation réelle du degré d'humification (Clymo, 1984). La diminution apparente du degré d'humification en dessous de 30 cm s'explique par un retour aux conditions normales, sans effet d'accumulation, dans le catotelme.

Dans le catotelme, la différence des degrés d'humification entre 10500-2800 et 2800-1000 cal. BP peut s'expliquer par des compositions végétales différentes. En effet, il a été montré que le degré de décomposition des tourbières est corrélé avec les constituants chimiques des plantes, en particulier avec la quantité d'azote, c'est-à-dire que dans un environnement similaire, certains végétaux se décomposent plus facilement que d'autres (Clymo, 1991). Entre la base (10600 cal. BP) et 2800 cal. BP, les végétaux semblent mieux se décomposer que dans la partie supérieure du catotelme, suggérant un changement d'écosystème vers 2800 cal. BP. Cette hypothèse est soutenue par les données polliniques de Cartier et al. (2021) qui montrent un changement important de végétation entre 3600 et 2100 cal. BP avec la disparition des arbres, en particulier du Pin et du Bouleau qui étaient jusqu'alors dominants, et le développement d'herbacés, en particulier de Poaceae. Ce changement d'écosystème illustre l'enregistrement de l'activité anthropique régionale par la tourbière puisqu'il est relié au défrichement du

domaine pour la culture de céréales (Cartier et al., 2021). La période 500-260 cal. BP riche en matériel minéral implique une augmentation de l'apport détritique que plusieurs hypothèses peuvent expliquer. La baisse de MO et l'augmentation des minéraux traduisent un déboisement du bassin versant, favorisant l'érosion des sols et le transport détritique. La période couverte par cette section de la carotte correspond à peu de choses près au Petit Âge Glaciaire enregistré en Europe entre 1850 et 1550 cal. AD (Jones & Bradley, 1992 ; Mann, 2002). Celui-ci étant caractérisé par une baisse de la température accompagnée de fortes précipitations (Grove, 2001), il est possible que cet épisode ait été enregistré dans la tourbe, le transport de matériel détritique par les précipitations accrues de cette période (Grove, 2001). Un grand nombre de feux d'origine anthropique a été répertorié à cette période (Stevenson & Rhodes, 2000 ; Valbuena et al., 2000) et soutient l'hypothèse de l'action anthropique. La couche de tourbe sableuse vers 4800 cal. BP peut-être encore une fois la marque de fortes précipitations érodant et transportant des sédiments détritiques.

2-Dynamique d'accumulation de la tourbière

Une comparaison des différents modèles d'âge proposés dans la littérature pour les tourbières de la région du Mont Lozère (Cornet & Wales, 2020) indique la présence d'une anomalie dans le modèle d'âge de la tourbière du Peschio. Le schéma d'accumulation sédimentaire généralement observé dans la région correspond à une augmentation lente et progressive pour les sédiments les plus en profondeur, avec un faible TAS (de l'ordre de 0,1-0,01 mm/an), suivit d'une augmentation plus rapide en surface, associée à un TAS plus important (de l'ordre de 5 mm/an) (Bottollier-Curtet & Muller, 2009 ; Muller et al., 2019 ; Cornet & Wales, 2020). Pour le modèle d'âge de la tourbière du Peschio, une diminution anormale du TAS a lieu entre 50 cm et la surface de la tourbière (Charieau & Larrieu, 2021). Cette anomalie est liée à la méthode

utilisée pour produire le modèle d'âge qui montre une diminution anormale du TAS entre 800 cal BP et le présent. Elle ne sera donc pas prise en compte dans la suite de cette étude puisqu'elle ne représente pas le TAS réel de la tourbière du Peschio (Charieau & Larrieu, 2021).

Malgré l'anomalie du TAS à la surface, les taux d'accumulation sédimentaire suivent le schéma généralement observé dans les tourbières du Massif Central (Bottollier-Curtet & Muller, 2009 ; Muller et al., 2019). Le TAS nettement plus élevé de la partie supérieure de PES-01 (1,25 mm/an) s'explique par une décomposition rapide de la matière organique dans l'acrotelme mais aussi par une faible compaction de cette zone. À l'inverse, en profondeur, le faible TAS (0,05 mm/an) est causé par la forte compaction de la tourbe et l'ancienneté de la matière organique (Clymo, 1991). Les TAS observés semblent cohérents avec les taux de sédimentation observés dans le Sud du Massif Central par Bottollier-Curtet & Muller (2009) et Muller et al. (2019). En effet, la tourbière des Vaquiers (Bottollier-Curtet & Muller, 2009) montre des TAS de l'ordre de 0,6 mm/an en profondeur et de 4,9 mm/an en surface. La tourbière de Canroute (Muller et al., 2019) montre quant à elle des TAS compris entre 0,12-0,27 mm/an. Cornet & Wales (2020) ont cependant mis en avant des taux d'accumulation sédimentaire plus importants dans la partie supérieure de la tourbière des Nassettes (de l'ordre de plusieurs cm/an), qui sont relativement élevés pour la région.

3- Limites de l'étude

Un certain nombre de biais peuvent avoir impacté cette étude. Dans un premier temps, l'utilisation de la méthode de Troels-Smith et la description visuelle de la carotte PES-01 peuvent être remises en question du fait du biais apparent de l'observateur. De plus, l'élaboration et l'exécution du protocole d'estimation du degré d'humification s'accompagnent d'incertitudes (étalonnage, précision de mesure, estimation visuelle de la turbidité) (Stanek & Silc, 1977) auxquelles

nous pourrions pallier en mesurant la turbidité de nos échantillons par spectrophotométrie (% d'absorbance). Une partie des résultats du protocole de perte au feu montre des anomalies de mesures avec des teneurs en carbonates négatives (jusqu'à -400%), provenant probablement de la pesée des creusets entre chaque calcination, et peut donc remettre en question une partie de notre interprétation.

La confrontation de nos résultats à ceux de Cartier et al. (2021) doit elle aussi être prise avec précaution. La différence de résolution des données utilisées (tous les 10 cm pour la PAF et tous les 42 cm pour le pollen) peut amener à une corrélation moins précise qu'espéré.

Enfin, la forme en pointe de l'extrémité du carottier russe, qui permet une entrée facile dans le substrat tout en préservant au maximum la stratigraphie de l'échantillon, empêche l'échantillonnage des premiers cm de dépôts au-dessus de la roche mère. Il est donc difficile de tirer des conclusions sur la genèse de la tourbière.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude sédimentologique réalisée sur la carotte PES-01 a permis de mettre en avant le développement de la tourbière du Peschio depuis la fin du tardiglaciaire. La tourbière du Peschio, mise en place à partir du ruisseau de Peschio, est une tourbière minérotrophe au stade de fen depuis au moins 10000 cal. BP, comme en attestent les résultats stratigraphiques et polliniques.

Au cours de son histoire et de son évolution, la tourbière du Peschio a enregistré trois événements : le début de l'accumulation de tourbe il y a 10 500 ans cal. BP, un changement de végétation aux alentours de 2800 cal. BP et enfin le Petit Âge Glaciaire et l'activité humaine entre 500-260 cal. BP. Le changement d'écosystème il y a 2800 cal. BP illustre l'enregistrement de l'activité anthropique par la tourbière puisqu'il est relié au défrichement du domaine pour la culture de céréales. L'enregistrement entre 500-260 cal. BP, met en évidence le fait que la tourbière du Peschio enregistre une nouvelle

fois l'activité humaine, avec d'important incendies durant cette période, mais aussi le refroidissement du Petit Âge Glaciaire.

La sédimentologie de PES-01 nous a donc permis de mettre en lien les degrés d'humification, la composition minérale de la tourbe ainsi que sa stratigraphie avec différents événements climatiques et anthropiques de la région. L'étude des macrorestes que nous n'avons pas pu réaliser dans ce contexte de pandémie présente un intérêt aussi bien paléobotanique que climatique, et pourrait affiner l'interprétation de nos données.

REFERENCES

- Aaby B. & Tauber H. (1975). Rates of peat formation in relation to degree of humification and local environment, as shown by studies of a raised bog in Denmark. *Boreas*, 4(1) : 1-17.
- Aaby B. (1976). Cyclic Climatic Variations in Climate over the Past 5,500 Yr Reflected in Raised Bogs. *Nature*, 263 : 281-284.
- Aaby B. (1986). Paleocological studies of mires. In : B.E. Berglund (ed.), *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 145-164.
- Aaby B. & Berglund B.E. (1986). Characterization of peat and lake deposits. In : B.E. Berglund (ed.), *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 231-246.
- Anderson R.L., Foster D.R. & Motzkin G. (2003). Integrating Lateral Expansion into Models of Peatland Development in Temperate New England. *Journal of Ecology*, 91(1) : 68-76.
- Bal M.C., Allée P. & Liard M. (2015). The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses: Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. *Quaternary International*, 366 : 3-14.
- Ball D.F. (1964). Loss on ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science*, 15(1) : 84-92.
- Blackford J.J. & Chambers F.M. (1993). Determining the degree of peat decomposition for peat-based palaeoclimatic studies. *International peat journal*, 5 : 7-24.
- Bottollier-Curtet M. & Muller S.D. (2009). Dynamique et Contexte Passés Du Développement d'une Tourbière Méditerranéenne (Massif de l'Aigoual, France). *Comptes Rendus Biologies*, 332(1) : 69-82.
- Cartier A., Creusot P. & Delandhuy A. (2021). Étude palynologique de la dynamique végétale holocène de la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 37-54.
- Castro D., Souto M., Garcia-Rodeja E., Pontevedra-Pombal X. & Fraga M.I. (2015). Climate Change Records between the Mid- and Late Holocene in a Peat Bog from Serra Do Xistral (SW Europe) Using Plant Macrofossils and Peat Humification Analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 420 : 82-95.
- Chambers F.M., Booth R.K., De Vleeschouwer F., Lamentowicz M., Le Roux G., Mauquoy D., Nichols J.E. & van Geel B. (2012). Development and refinement of proxy-climate indicators from peats. *Quaternary International*, 268 : 2133.
- Chambers R.M., Gorsky A.L., Castañeda-Moya E. & Rivera-Monroy V.H. (2021). Evaluating a Steady-State Model of Soil Accretion in Everglades Mangroves (Florida, USA). *Estuaries and Coasts* (2021).
- Charieau F. & Larrieu M. (2021). Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 55-72.
- Cholet J., Cubizolle H. & Laggoun F. (2010). Tourbières des montagnes françaises. In : J. Cholet & G. Magnon (eds.), *Nouveaux éléments de connaissance, de réflexion & de gestion*. Pôle-relais Tourbières, Besançon, pp. 36-52.
- Clymo, R.S. (1984). The limits to peat bog growth. *Philosophical Transactions of the*

- Royal Society. London B*, 303(1117) : 605-654.
- Clymo R.S. (1991). Peat growth. *In* : L.C.K. Shane & E.J. Cushing. (eds.), *Quaternary Landscapes*, University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 76-112.
- Cornet F. & Wales A. (2020). Reconstitution des paléo-incendies du Mont Lozère (Cévennes, France) du Tardiglaciaire à nos jours. *Orpalm Synthesis*, 13 (1) : 9-24.
- Cubizolle H., Georges V., Latour C., Argant J., & Serieyssel K. (2004). La turfigenèse à la fin du Subboréal et au Subatlantique dans les tourbières basses du Massif Central oriental granitique (France): une manifestation de l'action humaine? *Quaternaire*, 15(4) : 343-59.
- Cubizolle H., Tholly J., Oberlin C., Tourman A. (2015). La mise en place et l'extension latérale des tourbières au tardiglaciaire et à l'holocène sur la bordure orientale du Massif Central (France) : l'exemple de la tourbière de Molhiac dans les monts du Forez. *Quaternaire*, 26(4) : 293-306.
- Decorsiere J., Delamare-Deboutteville J. & Lecerf C. (2019). Reconstitution de 13 500 ans d'histoire d'une tourbière dans le Sud de la France. *Orpalm Synthesis*, 12 (1) : 29-39.
- Degorce J.-N. (1995). *Les milieux humides dans la Loire*. Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, 381 p.
- Domisch T., Finér L., Laine J. & Laiho R. (2006). Decomposition and Nitrogen Dynamics of Litter in Peat Soils from Two Climatic Regions under Different Temperature Regimes. *European Journal of Soil Biology*, 42(2) : 74-81.
- Gorham E. (1991). Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecological Applications*, 1(2) : 182-195.
- Grove A.T. (2001). The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe. *Climatic Change*, 48(1) : 121-136.
- Halsey L.A., Vitt D.H. & Bauer I.E. (1998). Peatland initiation during the Holocene in continental western Canada. *Climatic Change*, 40(2) : 315-342.
- Jones P.D. & Bradley R.S. (1992). Climatic variations over the last 500 years. *In* : R.S. Bradley & P.D. Jones (eds.), *Climate since AD 1500*. Routledge, London & New York, pp. 649-665.
- Jowsey P.C. (1966). An Improved Peat Sampler. *New Phytologist*, 65(2) : 245-248.
- Julve P. (1996). Les tourbières de France : écologie et valeur patrimoniale. *Les Cahiers Scientifiques et Techniques du réseau Tourbières de France*, 1 : 2-7.
- Juma N.G. (1998). *The pedosphere and its dynamics: a system approach to soil science. Volume 1: introduction to soil science and soil resources*. Quality Color Press Inc., Edmonton, 315 p.
- Kalnina L., Stivrins N., Kuske E., Ozola I., Pujate A., Zeimule S., Grudzinska I. & Ratniece V. (2015). Peat Stratigraphy and Changes in Peat Formation during the Holocene in Latvia. *Quaternary International*, 383 : 186-95.
- Loizeau J.-L., Girardclos S., & Dominik J. (2012). Taux d'accumulation de sédiments récents et bilan de la matière particulaire dans le Léman (Suisse-France). *Archives des Sciences*, 65 : 81-92.
- Malmer N. (2014). On the relations between water regime, mass accretion and formation of ombrotrophic conditions in Sphagnum mires. *Mires and Peat*, 14(7) : 1-23.
- Manneville O., Vergne V. & Villepoux O. (2006). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse, Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestlé, Paris, 319 p.
- Mann M.E. (2002). The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change, vol 1, Little Ice Age. *In* : T. Munn (ed.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons, Chichester, pp 504-509.
- Martin C., Didon-Lescot J. F. & Marc V. (2002). Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides du Mont-Lozère : L'exemple de la Tourbière des Sagnes. *Etudes de géographie physique*, 29 : 15-43.
- Martin C. & Didon-Lescot J. F. (2007).

- Influence d'une tourbière de moyenne montagne sur les écoulements : le cas de la tourbière des Sagnes sur le Mont Lozère. *Etudes de géographie physique*, 34 : 27-41.
- Moore P.D. (1987). Ecological and hydrological aspects of peat formation. *Geological Society, London, Special Publications*, 32(1) : 7-15.
- Moore P.D. (1989). The ecology of peat-forming processes: a review. *International Journal of Coal Geology*, 12(1-4) : 89-103.
- Muller S.D. (2002). Influence de la végétation sur l'accumulation de la tourbe au Québec méridional. *Comptes Rendus Biologies*, 325(5) : 629-40.
- Muller S.D., Richard P.J.H. & Larouche A.C. (2003). Holocene Development of a Peatland (Southern Québec): A Spatio-Temporal Reconstruction Based on Pachymetry, Sedimentology, Microfossils and Macrofossils. *The Holocene*, 13(5) : 649-64.
- Muller S.D., Bremond L., Girard V. & Terral J.-F. (2019). Âge des tourbières de la marge méridionale du Massif Central. *Orpalm Synthesis*, 12 (1) : 9-15.
- Pulido Avila M. (2006). *Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique post-glaciaire de la végétation dans le sud du Massif Central, France*. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille, 308 p.
- Ragette G. & Wotawa G. (1998). The evaporation of precipitation and its geographical distribution. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(4) : 393-39
- Szajdak L.W., Jezierski A., Wegner K., Meysner T. & Szczepanski M. (2020). Influence of Drainage on Peat Organic Matter: Implications for Development, Stability, and Transformation. *Molecules*, 25(11) : 2587
- Stanek W. & Silc T. (1911). Comparisons of four methods for determination of degree of peat humification (decomposition) with emphasis on the von Post method. *Canadian Journal of Soil Science*, 57 : 109-117.
- Stevenson A.C. & Rhodes A.N. (2000). Palaeoenvironmental evaluation of the importance of fire as a cause for Calluna loss in the British Isles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1-4) : 195-206.
- Troels-Smith J. (1955). Karakterisering af lose jordarter (Characterisation of Unconsolidated Sediments). *Danmarks Geologiske Undersogelse*, 3 : 39-73.
- Valbuena L., Tárrega R. & Luis-Calabuig E. (2000). Seed banks of *Erica australis* and *Calluna vulgaris* in a heathland subjected to experimental fire. *Journal of Vegetation Science*, 11(2) : 161-166.
- Wastiaux C. (2008). Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 50 : 57-66.
- Wu J. & Roulet N.T. (2014). Climate change reduces the capacity of northern peatlands to absorb the atmospheric carbon dioxide: The different responses of bogs and fens. *Global Biogeochemical Cycles*, 27 : 1005-1024.

ANNEXE 1. Système de classification de la composition de la tourbe (d'après [Troels-Smith, 1955](#))

Etat	Code	Nom	Description
<i>Substantia</i>	Sh	<i>S. humosa</i>	Substance humique, éléments microscopiques homogènes
<i>Turfa</i>	Tb	<i>T. bryophytica</i>	Fragments de mousses (Bryophytes)
	Th	<i>T. herbacea</i>	Fragments de plantes herbacées < 2 mm
	Tl	<i>T. lignosa</i>	Tiges et racines emmêlées de plantes ligneuses
<i>Detritus</i>	Dh	<i>D. herbosus</i>	Fragments de plantes herbacées > 2 mm

ÉTUDE PALYNOLOGIQUE DE LA DYNAMIQUE VÉGÉTALE HOLOCÈNE DE LA TOURBIÈRE DU PESCHIO (MONT LOZÈRE)

Amandine Cartier ¹, Pierre Creusot ², Alexia Delandhuy ³

Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier (UMR 5554)

Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France

¹ cartieramandine28@gmail.com, ² pierre.creusot@protonmail.com,

³ alex.delandhuy@gmail.com

Encadrement : Serge Muller

Texte corrigé par S. Muller

Citation : Cartier A., Creusot P. & Delandhuy A. (2021). Étude palynologique de la dynamique végétale holocène de la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 37-54.

Résumé : Une analyse pollinique a été réalisée dans la tourbière du Peschio (Mont Lozère, France) afin de reconstituer les dynamiques végétales régionales et locales au cours de l'Holocène. Les résultats obtenus confirment les grands traits de l'histoire de la végétation déjà décrite dans les études antérieures, et révèlent l'enregistrement du Dryas récent, encore jamais mis en évidence dans ce site. Nous mettons plus particulièrement l'accent sur les événements anthropiques et climatiques qui ont marqué l'Holocène du sud du Massif Central et sur leur impact sur la végétation.

Mots clés : Cévennes, Holocène, reconstitution des paysages, impact anthropique

Abstract: *Palynological study of the Holocene plant dynamics of the Peschio peatland (Mont Lozère)*. A pollen analysis has been undertaken in the Peschio peatland (Mont Lozère, France) to reconstruct the local and regional plant dynamics during the Holocene. The obtained results confirm the main features of the vegetation history already described in previous studies, and reveal the record of Dryas, never evidenced in this site. We highlight more particularly the anthropogenic and climate events that have marked the Holocene of southern Massif Central and their impact on vegetation.

Keywords: Cévennes, Holocene, landscape reconstitution, anthropogenic impact

La paléopalynologie a pour objet d'étude les grains de pollen et les spores piégés dans les dépôts sédimentaires et tourbeux (Barbier-Pain, 2013). Les variations des assemblages polliniques permettent de retracer l'histoire des communautés végétales, et donnent des informations indirectes sur l'histoire du climat (Barbier-Pain, 2013). En comprenant et en analysant les événements

passés, il est possible de déterminer les facteurs climatiques et anthropiques qui ont influencé les dynamiques végétales. Les recherches dans ce domaine sont par la suite susceptibles d'aider à la gestion, à la protection et à la conservation de la biodiversité (Birks, 1996).

Les tourbières sont des zones humides caractérisées par une accumulation de matière organique, dont la dégradation est limitée par

l'anoxie et l'acidité (Muller, 2002). Les conditions anaérobies de la tourbe limitent la dégradation du pollen (Reille & Lowe, 1993), qui se conserve remarquablement bien grâce à la sporopollénine qui compose l'exine. Cette substance chimique est l'une des plus résistantes du monde vivant (Brooks & Shaw, 1978 ; Reille, 1990, 2013). Si cela fait de ces formations végétales de précieuses archives (Reille et al., 1996), elles sont également l'habitat de nombreuses espèces d'intérêt patrimonial. Ainsi, les tourbières du Mont-Lozère (Fig. 1) abritent des espèces actuellement en danger, comme le malaxis des marais (*Hammarbya paludosa*, Orchidaceae ; E. Sulmont, comm. pers.). L'histoire de la végétation du sud du Massif Central est relativement bien connue, grâce à de nombreuses études polliniques antérieures (de Beaulieu & Gilot, 1972 ; de Beaulieu, 1974 ; de Beaulieu & Pons, 1979 ; de Beaulieu, Pons & Reille, 1985, 1987 ; Reille, 1990 ; Heinz & Thiébault, 1998 ; Pulido

Avila, 2006). Ces études ont notamment défini la dynamique végétale holocène régionale, résumée ci-dessous selon la chronostratigraphie classique de l'Holocène européen (Table 1) :

1. Pendant le Préboréal (11700-10100 cal. BP) et le Boréal (10100-8900 cal. BP), subsistent des pinèdes, qui sont rapidement remplacées par des corylaies (composées de *Corylus*, *Quercus* et *Ulmus*).
2. À l'Atlantique (8900-5400 cal. BP), s'étendent des chênaies diversifiées à *Fraxinus*, *Tilia* et *Ulmus*, toujours mêlées de *Corylus*.
3. Au Subboréal (5400-2800 cal. BP), la chênaie est repoussée par la hêtraie (*Fagus*), et *Pinus* recolonise les hautes altitudes.
4. Enfin, au Subatlantique (2800 cal. BP-actuel), l'anthropisation entraîne l'ouverture des paysages, conséquence des déboisements et de l'agropastoralisme.

Période	Âges cal. BP	Périodes historiques	Profondeurs PES (cm)
Préboréal	11700 - 10100	Fin du Paléolithique et début du Mésolithique	298-299
Boréal	10100 - 8900	Mésolithique	
Atlantique	8900 - 5400	Début du Néolithique - Âge du cuivre	252-253
Subboréal	5400 - 2800	Âge du bronze	210-211
	2800 - 2050	Âge du fer	168-169
	2050 - 1450	Epoque gallo-romaine	
Subatlantique	1450 - 450	Moyen-Âge	126-127, 84-85, 42-43
	450 - 150	Epoque moderne	
	150 - actuel	Epoque contemporaine	1-2

Table 1. Chronostratigraphie classique de l'Holocène européen (d'après Mangerud et al., 1974 ; de Beaulieu, 1982 ; Bintz et al., 1989 ; Muller, 2005 ; David, 2014) et position des échantillons étudiés sur la carotte

ÉTUDES POLLINIQUES DANS LE SUD DU MASSIF CENTRAL (DES CÉVENNES À LA MONTAGNE NOIRE) : ETAT DES CONNAISSANCES

1- Premières études palynologiques de la région

La toute première étude palynologique ayant eu lieu dans le sud du Massif Central est celle de Firbas (1932). Dans celle-ci, est décrit un profil de la tourbière de Montals située sur la montagne du Lingas (Massif de l'Aigoual,

Cévennes). Quelques années plus tard, Lemeë (1943) présente les premières analyses polliniques réalisées sur le Mont Lozère. Un des éléments intéressants soulevés par ces études est la dominance de *Betula* dans le stade initial représentant le Préboréal. Cette analyse rejoint celle de Bintz et al. (1989), qui montre, dans les Alpes du Nord, que les taxons arbustifs pionniers régressent au Tardiglaciaire au profit de *Betula*. J.-L. de Beaulieu (de Beaulieu & Gilot, 1972 ; de Beaulieu, 1974 ; de Beaulieu & Pons, 1979 ; de Beaulieu, Pons & Reille, 1985, 1987) a poursuivi ce travail en réalisant des

recherches sur la végétation du sud-est du Massif Central. Ses publications portent notamment sur des tourbières du Mont Lozère (de Beaulieu & Gilot, 1972), des Monts de l'Espinouse, de la Montagne Noire et de l'Aigoual (de Beaulieu, 1974). Dans les Monts de Lacaune, il a étudié l'origine d'*Abies* au Subboréal et sa distribution biogéographique. En parallèle, Jalut (1973) a montré qu'*Abies* s'est développé dès le début du Postglaciaire dans les Pyrénées, tandis que Lemée (1942) propose une origine depuis les Alpes.

2- Successions végétales régionales

La dynamique végétale postglaciaire du sud du Massif Central a été étudiée par différents auteurs (de Beaulieu & Gilot, 1972 ; de Beaulieu, 1974 ; de Beaulieu & Pons, 1979 ; de Beaulieu, Pons & Reille, 1985, 1987 ; Reille, 1990 ; Heinz & Thiébault, 1998 ; Pulido Avila, 2006). Plusieurs études attestent, à la fin du Préboréal (10 100 cal. BP), la présence de *Pinus sylvestris*-type, qui semble être déjà en régression alors que *Corylus* s'installe (de Beaulieu & Gilot, 1972 ; de Beaulieu, 1974 ; Reille, 1988). Elles montrent également la présence de Poaceae et d'*Artemisia*, des indicateurs de steppes arides et froides ayant existé durant le Tardiglaciaire et qui persistent encore aux altitudes élevées (Reille, 1988). Par la suite, durant le Boréal, s'installe une forêt décidue dominée par *Corylus* (qui peut atteindre 40% à son maximum à la fin du Boréal), mêlé de *Quercus pubescens*-type et *Ulmus* (Reille, 1988). À partir de 8800 cal. BP, le noisetier disparaît pour laisser place à des chênaies diversifiées de *Quercus pubescens*-type, *Fraxinus*, *Tilia* et *Ulmus*, qui règnent durant l'Atlantique (Reille, 1988). de Beaulieu & Gilot (1972) attribuent la persistance de *Pinus* durant cette période à un effet de crête, à la faveur des températures basses et des vents forts sur les sommets. Durant l'Atlantique, autour de 6300 cal. BP, apparaissent des îlots de *Fagus* et d'*Abies* (de Beaulieu, 1974). *Fagus* s'impose à partir de 5200 cal. BP, comme espèce dominante d'une hêtraie-sapinière dans laquelle *Abies* ne joue

qu'un rôle très secondaire (de Beaulieu, 1974 ; Reille, 1988). *Fagus* a besoin d'humidité et d'ombre pour se développer et devient très compétitif après quelques années de croissance (Packham et al., 2012). de Beaulieu remarque un phénomène intéressant : la période qui précède immédiatement l'augmentation de *Fagus* est marquée dans tous ses diagrammes polliniques par un maximum de *Tilia*. Il suppose que cet événement est un indice de l'accroissement de l'humidité et rejoint les observations de Nègre (1972) sur les versants septentrionaux des Pyrénées centrales, où *Tilia* caractériserait un stade initial de la hêtraie (de Beaulieu & Gilot, 1972). Le déclin soudain de la chênaie diversifiée à *Tilia* et *Ulmus*, suivie de l'apparition de *Fagus*, marque la fin de l'optimum de l'Atlantique et le début de conditions climatiques plus fraîches (Pulido Avila, 2006). Le Subboréal est caractérisé par un climat frais et humide, où la hêtraie reste stable jusqu'aux premiers signes de défrichements importants à l'époque gallo-romaine, où *Fagus* et *Abies* régressent (de Beaulieu, 1974 ; Reille, 1988). L'impact des activités anthropiques sera évoqué plus tard.

3- Une formation locale originale du Mont Lozère : la nardaie.

En se penchant sur la végétation du Mont Lozère, plusieurs auteurs ont décrit une formation originale : la nardaie constitue actuellement sur le Mont Lozère la plus grande zone de pelouse pseudoalpine continue du sud du Massif Central. Elle forme sur la zone sommitale une pelouse de plus de 50 km² d'un seul tenant. De telles surfaces de pelouse naturelle à nard ne sont observées qu'en Scandinavie, même si la présence de *Nardus stricta* n'est pas rare dans les montagnes du sud de l'Europe (Reille, 1988). Bien que la distinction *Nardus*/Poaceae est difficile et empêche de définir la réelle apparition du nard, les premiers grains de pollen attribuables à *Nardus* semblent dater du Préboréal (de Beaulieu & Gilot, 1972). La nardaie se serait développée d'abord sur les crêtes du Mont Lozère, où les lieux sont

défavorables à toute formation forestière du fait de conditions climatiques et physiographiques difficiles (froid, moins d'oxygène, pente ; de Beaulieu & Gilot, 1972 ; Reille, 1988). La pelouse à nard a ensuite pu s'imposer très largement sur le Mont Lozère grâce au léger refroidissement du Subboréal et à la pression anthropique. En effet, c'est dès la fin de l'Atlantique, lorsqu'ont eu lieu les premiers défrichements de l'Âge du cuivre, que la nardaie commence à s'étendre (de Beaulieu & Gilot, 1972). Au Subatlantique, les activités pastorales entraînent la régression de la hêtraie et permettent à la nardaie d'atteindre son aire actuelle. L'extension de la nardaie est donc récente, due au changement climatique et renforcée par les activités humaines telles que le pâturage (de Beaulieu & Gilot, 1972).

4- Mécanismes d'apparition et de maintien des milieux ouverts et boisés

Le cas de la nardaie met en évidence le rôle du climat et des activités humaines sur les paysages naturels. Les oscillations climatiques de l'Holocène précédemment évoquées ont influencé la dynamique végétale du Massif Central. Mais les activités humaines jouent également un rôle majeur, en particulier durant l'Holocène final. Ces activités ont pu entraîner localement des pertes de biodiversité, toutefois difficiles à évaluer à partir des enregistrements polliniques. La thèse de Pulido Avila (2006), qui concerne les conséquences de l'anthropisation, est la première et la plus complète des études réalisées sur ces territoires. Cette thèse apporte des données chronologiques plus précises que les études antérieures, notamment sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère), et pourra servir de comparatif à notre étude. La présence des populations humaines a influencé les paysages par la mise en culture d'espèces végétales domestiquées et le développement d'interactions durables avec certaines espèces non domestiquées, dites synanthropiques (de Beaulieu & Pons, 1979 ; Pulido Avila, 2006). Les plantes rudérales, comme *Artemisia*, les

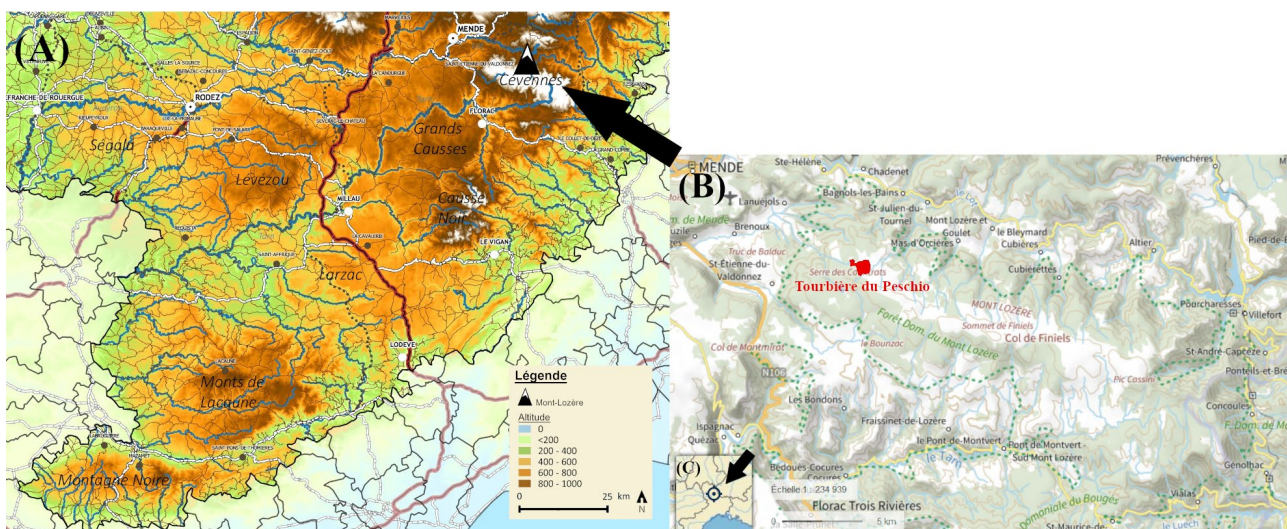
Asteroideae et les Cichorioideae, colonisent les milieux anthropisés (Pulido Avila, 2006). Les premiers défrichements forestiers, en lien avec l'extension des pâturages, sont observés dès l'Âge du cuivre (Table 1). Néanmoins, ses effets sont moindres et inégaux, n'ayant aucunement impacté l'abondance des espèces ligneuses présentes à l'échelle régionale (de Beaulieu & Pons, 1979). À partir du début de notre ère, correspondant à la période gallo-romaine, est observée une régression généralisée des forêts au profit de l'agropastoralisme. On assiste à une expansion des arbres cultivés, tels que *Castanea*, *Juglans* et *Olea*, et des taxons liés au pâturage, comme *Bistorta*, *Centaurea nigra*-type, *Plantago lanceolata*-type et *Rumex*-type (Pulido Avila, 2006). L'apparition de ces taxons indicateurs de pâturage indique de manière indirecte l'implantation d'activités humaines diverses, telles que la métallurgie qui nécessite du combustible et donc l'exploitation des forêts (Baron et al., 2005). Globalement, les populations humaines de plus en plus nombreuses entraînent la régression des écosystèmes forestiers au profit des milieux ouverts (Muller, 2005). Des événements historiques peuvent aller à l'inverse de cette tendance. Les études menées sur la tourbière du Peschio au Mont Lozère montrent une recrudescence des arbres (*Fagus*, *Pinus*) entre la période de défrichement cité précédemment et le début du Moyen-Âge (de Beaulieu & Pons, 1979). Cette remontée pourrait être attribuée à la période des invasions (III^e-VI^e siècles), lorsque l'empire romain subit une crise démographique et que la conquête par les « barbares » pousse de grandes populations romaines à migrer (Latouche, 1947), entraînant une déprise agricole (de Beaulieu & Pons, 1979 ; Pulido Avila, 2006). Par la suite, *Fagus* régresse à nouveau et l'expansion de *Calluna* indique que les landes s'étendent, en probable relation avec la métallurgie médiévale (Pulido Avila, 2006). En effet, durant le Moyen-Age, les activités de métallurgie (Baron et al., 2005) et les incendies d'origine anthropique entraînent une ouverture généralisée des paysages (Tinner et al., 2005 ; Carrion et al., 2010).

Calluna vulgaris est présente en abondance autour de la tourbière du Peschio. Elle pousse sur des terres acides et est indifférente à l'hydrologie du sol (Rameau et al., 2008). *C. vulgaris* est appréciée par les moutons (Anderson & Yalden, 1981) et se régénère bien après les incendies (Doche, 1988). La présence, au Moyen-Âge, des céréales, de *Castanea* et dans une moindre mesure de *Corylus* sont des indices de l'activité humaine et de son action sur la végétation : les arbres plantés sont plus abondants et le pollen lié au pâturage est retrouvé de façon continue (de Beaulieu & Pons, 1979 ; Pulido Avila, 2006). L'augmentation de la richesse pollinique au cours des derniers millénaires pourrait ainsi être due à l'introduction de plantes domestiques et à l'abondance des herbacées qui profitent de l'ouverture des milieux. Jusqu'au 19^e siècle, l'augmentation de la démographie s'accompagne d'une intensification des impacts anthropiques. En revanche, à partir de 1860, l'activité agropastorale régresse (de Beaulieu & Pons, 1979) et des campagnes de reboisements permettent de reforester les massifs cévenols. Ces reboisements sont révélés dans les diagrammes polliniques par l'augmentation du taux de *Pinus* (de Beaulieu & Pons, 1979 ; Reille, 1988). Les activités de métallurgie sont à l'origine de fortes teneurs en plomb dans le sol aux alentours de ces sites. *Betula*, malgré sa capacité à piéger ce plomb dans ses

racines, se retrouve contaminé et peine à recoloniser le milieu (Ploquin, 2010).

OBJECTIF DE L'ETUDE

Notre travail, réalisé dans les Cévennes, s'intéresse à la dynamique végétale de la tourbière du Peschio se situant sur le Mont-Lozère (Fig. 1) et apporte de nouvelles informations sur l'histoire de cette tourbière au cours de l'Holocène. Dans un premier temps, la comparaison des données polliniques avec un relevé phytosociologique permet de discuter la relation pollen-végétation afin d'évaluer les éventuels biais de l'enregistrement pollinique et de caractériser l'enregistrement pollinique de la végétation actuelle de la tourbière. Les biais sont liés à la taphonomie et à la production et la dispersion des grains de pollen, différentes selon les taxons. Dans un second temps, la réalisation d'une datation radiocarbone a permis de positionner des repères chronologiques tout du long de nos carottes sédimentaires, indiquant les périodes et l'âge maximal retrouvé dans notre sondage. L'objectif de cette étude est de reconstituer l'histoire holocène de la tourbière du Peschio, en identifiant les dynamiques végétales locale et régionale, et de les mettre en lien avec les événements climatiques et anthropiques du sud du Massif Central.



MATERIEL ET METHODES

1- Zone d'étude

La tourbière du Peschio (min 44°27' N, 3°37' E, max 44°28' N, 3° 38' E ; [Fig. 1](#)) se trouve sur le flanc nord-ouest du Mont Lozère, à 1370 m d'altitude, et mesure environ 500-700 sur 700-800 m ([Pulido Avila, 2006](#)). Le Mont Lozère est un massif granitique d'origine hercynienne, inclus dans le Parc National des Cévennes ([Servera Vives et al., 2014](#)). Il s'étend sur 30 km, du nord-ouest au sud-est, et culmine à 1700 m ([Bal et al., 2015](#)). Le climat y est tempéré humide, avec des étés courts et froids, et les précipitations annuelles (1500 mm) sont principalement automnales (Annexe 1).

La construction d'une digue au Moyen-Âge a en partie ennoyé une tourbière préexistante ([Pulido Avila, 2006](#)). La tourbière actuelle est de type minérotrophe, c'est-à-dire qu'elle est alimentée à la fois par l'eau de pluie et par les eaux de ruissellement riches en minéraux. La tourbière du Peschio est caractérisée par une végétation très hygrophile dominée par des Cyperaceae et des sphaignes, car elle est inondée une grande partie de l'hiver ([Pulido Avila, 2006](#)). Les reliefs entourant la cuvette dans laquelle est installée la tourbière portent des landes arbustives de *Calluna vulgaris*, colonisée par *Betula pendula*, *Fraxinus excelsior* et *Pinus sylvestris*, et des prairies pâturées, dont les origines remonteraient au milieu du Néolithique-Chalcolithique ([Pulido Avila, 2006](#)).

2- Méthodes de terrain

Carottage

Les coordonnées du carottage étudié sont les suivantes : 44°27'53.186"N, 3°38'2.601"E ([Fig. 1](#)). Il a été réalisé à l'endroit le plus profond de la tourbière, identifié sur la base de mesures de profondeur réalisées le long de plusieurs transects ([D'Oliveira & Zitouni,](#)

[2021](#)). Le profil étudié comprend 4 carottes ([Fig. 2](#)), prélevées en quinconce dans 2 trous et photographiées avant leur emballage dans du film plastique ([Charieau & Larrieu, 2021](#)). Les carottes A1 et A2 ont été prélevées dans le premier trou et les carottes B1 et B2 dans le second trou ([Fig. 2](#)). Après avoir corrélié chaque extrémité des 4 carottes les unes avec les autres ([Fig. 2](#)), nous avons obtenu trois m de carotte de tourbe.

Prélèvements sédimentaires

Dans le but d'étudier les carottes prélevées, des prélèvements sédimentaires ont été effectués et décrits dans l'article de [D'Oliveira & Zitouni \(2021\)](#) et synthétisés en un log stratigraphique ([Fig. 2](#)). Ce log décrit la composition de la tourbe : débris herbacés (Dh), substance humique (Sh) et bryophytes (Tb), auxquels sont associées des abondances relatives allant de 0 (absence) à plus de 1000.

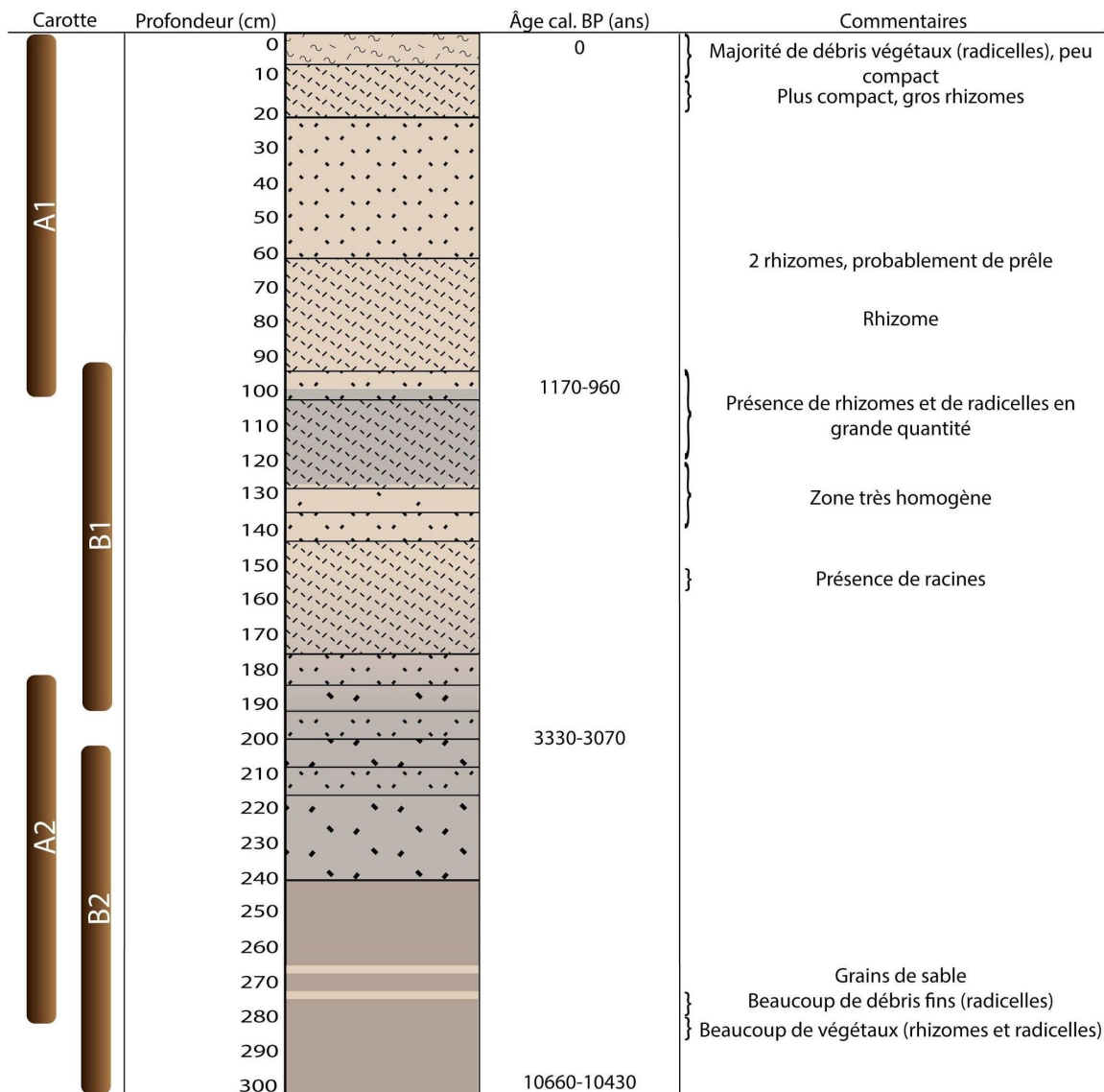
Inventaire botanique

Un inventaire phytosociologique a été réalisé sur la tourbière du Peschio ([Table 2](#)). La méthode utilisée est celle de [Braun-Blanquet \(1934\)](#), basée sur une aire minimale. Le recouvrement, c'est-à-dire l'aire du quadrat observé occupée par une espèce, a été estimé grâce à la projection au sol de la couverture foliaire des différentes espèces.

3- Méthodes de laboratoire

Chronologie

Plusieurs datations au radiocarbone ont été réalisées sur des échantillons de 1 cm³ à différentes profondeurs de la carotte. L'étalonnage des âges mesurés a ensuite été réalisé avec le logiciel Calib ([Stuiver & Reimer, 1993](#)), en utilisant la base de données de calibration IntCal20, qui permet de convertir les âges BP et âges cal. BP ([Reimer et al., 2020](#)). Le package Clam sur R a été utilisé pour faire le modèle d'âge en fonction de la profondeur (Annexe 2).



Légende:

	Tb2 Dh1 Sh1		Dh3 Sh1
	Dh2 Sh2		Dh1 Sh3
	Dh1 Sh2		Non analysé

Figure 2. Log stratigraphique de la tourbière du Peschio (d'après [D'Oliveira & Zitouni, 2021](#)). En légende : Dh, *Detritus herbosus* (débris herbacés) ; Sh, *Substantia humosa* (substance humique) ; Tb, *Turfa bryophytica* (bryophytes). Les numéros associés représentent les abondances relatives (0 : absence ; 1 : de 0 à 10 ; 2 : de 10 à 100 ; 3 : de 100 à 1000 ; 4 : > 1000).

Traitements chimiques

8 échantillons de 1 cm³ ont été prélevés sur la carotte (1-2, 42-43, 84-85, 126-127, 168-169, 210-211, 252-253 et 298-299 cm). Ils ont été traités en laboratoire afin d'en extraire le pollen. Le protocole utilisé pour ce procédé

est celui de [Berglund & Ralska-Jasiewiczova \(1986\)](#), avec un bain d'acide chlorhydrique, puis d'acide sulfurique, et enfin d'acide fluorhydrique pour éliminer les carbonates, la matière organique et la silice (Annexe 3). Le culot obtenu a été dilué dans de la glycérine

avant le montage sur lames fixées par de l'histolaque. Ces lames ont été utilisées pour identifier et compter le pollen présent au sein de la tourbière du Peschio.

Comptages

Chaque échantillon a été analysé entre une et trois fois à l'aide d'un microscope optique (x40). Lors du comptage, un minimum de cent grains de pollen par échantillon a été compté et identifié par chacun d'entre nous. Un nombre de taxons à identifier (19) a été défini au début de l'étude avec notre encadrant. En divisant le nombre de grains de pollen d'une espèce par le nombre de grains de pollen comptés sur une lame, le tout rapporté sur 100, nous obtenons un taux d'abondance relative (%). La richesse pollinique correspond au nombre de taxons pour chaque échantillon.

Le ratio de pollen arboréen (PA) permet de représenter le taux (en pourcentage) de pollen d'arbre pour chaque échantillon. Il est calculé grâce à la formule suivante :

$$PA = \frac{SPA}{SP} * 100$$

avec : SPA, somme du pollen arboréen ; SP, somme pollinique (hors indéterminés)

Nos comptages ont permis d'obtenir un diagramme pollinique grâce au logiciel R (Fig. 4).

RESULTATS

1- Étude phytosociologique

Le relevé phytosociologique de la tourbière du Peschio (Table 2) révèle l'abondance de sphaigne inondée (*Sphagnum inundatum* Russ.), de trèfle d'eau (*Menyanthes trifoliata* L.), de prêle des eaux (*Equisetum fluviatile* L.) et de linaigrette à feuilles étroites (*Eriophorum angustifolium* Honck.), qui sont des espèces caractéristiques des tourbières. La laïche des bourniers (*Carex limosa* L.), qui est une espèce protégée au niveau national, est également présente en abondance.

2- Datations et modèle d'âge

Trois niveaux de la séquence étudiée ont été datés (Annexe 2). Les âges obtenus indiquent que la séquence couvre une période allant du Préboréal (Poz-130012 : 10 660-10 430 cal. BP) à l'actuel (surface). À l'image du modèle d'âge de Pulido Avila (2006), le modèle âge-profondeur et le taux d'accumulation sédimentaire (TAS, compris entre 0,1 et 0,2 mm.an⁻¹) sont constants entre 10 430 et 3500 cal. BP (Fig. 3). Ainsi, les 1 m de tourbe compris entre 3 et 2 m de profondeur renferment plus de 6000 ans d'histoire. En revanche, les 2 m supérieurs renferment moitié moins d'histoire, soit environ 3000 ans. Ces résultats concordent avec l'important TAS, qui augmente de 0,2 à 1,2 mm.an⁻¹ entre environ 200 et 75 cm.

3- Données palynologiques

Trois zones ont été définies sur le diagramme pollinique (Fig. 4) :

298-252 cm (10 380-6140 cal. BP)

La zone 1 correspond au Mésolithique et au début du Néolithique. Les enregistrements polliniques sont dominés par les herbacées (34-68%), avec une forte présence de Poaceae (8-16%), d'*Artemisia* (1-10%), d'Apiaceae et d'Asteroideae (1-9%). Les seuls arbres bien représentés sont *Pinus* (17-19%) et *Betula* (1-26%). Les autres ligneux retrouvés en faible pourcentage sont *Castanea* (0-2,5%) et *Quercus pubescens*-type (2-3%). *Corylus* apparaît assez rapidement pour atteindre 14%.

252-126 cm (6140-1320 cal. BP)

La zone 2 correspond aux Âges des métaux et à l'époque gallo-romaine. Elle est marquée par une occurrence de *Tilia* (1%) et par l'apparition de *Fagus* (8%). *Castanea* apparaît à la profondeur de 168 cm. Les autres pollens arboréens, tels que *Betula* et *Pinus*, sont globalement en diminution sur cette zone. Le taux de *Quercus ilex-coccifera* est plutôt faible, mis à part un pic à 18% à 168 cm. *Corylus* disparaît, puis réapparaît (5%) entre 168 et 126 cm.

Table 2. Inventaire des espèces présentes sur la tourbière du Peschio et relevés phytosociologiques réalisés à l'emplacement des deux carottes prélevées (aires minimales : 16 m²)

Carotte			PES-2020-1	PES-2020-2
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	Agrostide blanche	Poaceae	2	
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	Flouve odorante	Poaceae		
<i>Betula pendula</i> Roth.	Bouleau blanc	Betulaceae	1	
<i>Bistorta officinalis</i> Delarbre	Bistorte	Polygonaceae		
<i>Callitriche hamulata</i> Kütz. ex W.D.J.Koch	Callitriche à crochets	Plantaginaceae		
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	Callune	Ericaceae		
<i>Caltha palustris</i> L.	Populage des marais	Ranunculaceae		1
<i>Cardamine pratensis</i> L.	Cardamine des prés	Brassicaceae		(+)
<i>Carex canescens</i> L.	Laïche blanchâtre	Cyperaceae		5
<i>Carex diandra</i> Schrank	Laïche à deux étamines	Cyperaceae		
<i>Carex echinata</i> Murray	Laïche étoilée	Cyperaceae		
<i>Carex limosa</i> L.	Laïche des borbiers	Cyperaceae	1	1
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichenb.	Laïche brune	Cyperaceae	3	
<i>Carex panicea</i> L.	Laïche bleuâtre	Cyperaceae	1	
<i>Carex rostrata</i> Stokes	Laïche à bec	Cyperaceae		
<i>Cirsium palustre</i> (L.) Scop.	Cirse des marais	Asteraceae	(+)	(+)
<i>Comarum palustre</i> L.	Potentille des marais	Rosaceae	(2-3)	(2-3)
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soo	Orchis tacheté	Orchidaceae	(+)	(+)
<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv.	Canche cespitueuse	Poaceae		
<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Drejer	Canche flexueuse	Poaceae		
<i>Drosera rotundifolia</i> L.	Rosolis à feuilles rondes	Droseraceae		
<i>Epikeros pyrenaicus</i> (L.) Raf.	Sélin des Pyrénées	Apiaceae	(1-2)	(1-2)
<i>Epilobium palustre</i> L.	Épilobe des marais	Onagraceae	1	1
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	Prêle des eaux	Equisetaceae	2	4
<i>Eriophorum angustifolium</i> Honck.	Linaigrette à feuilles étroites	Cyperaceae	1	1
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.	Linaigrette vaginée	Cyperaceae	1	
<i>Galium parisiense</i> L.	Gaïlet d'Angleterre	Rubiaceae		(1-2)
<i>Galium saxatile</i> L.	Gaïlet des rochers	Rubiaceae		
<i>Galium uliginosum</i> L.	Gaïlet aquatique	Rubiaceae	1	
<i>Genista anglica</i> L.	Genêt d'Angleterre	Fabaceae		1
<i>Gentiana pneumonanthe</i> L.	Gentiane pneumonanthe	Gentianaceae		
<i>Holcus lanatus</i> L.	Houlque laineuse	Poaceae		
<i>Juncus acutiflorus</i> Ehrh. ex Hoffm.	Jonc à fleurs aiguës	Juncaceae		
<i>Juncus conglomeratus</i> L.	Jonc aggloméré	Juncaceae		
<i>Juncus effusus</i> L.	Jonc diffus	Juncaceae		
<i>Lotus pedunculatus</i> Cav.	Lotus des marais	Fabaceae		(+)
<i>Luzula congesta</i> (Thuill.) Lej.	Luzule à inflorescences denses	Juncaceae		
<i>Luzula multiflora</i> (Ehrh.) Lej.	Luzule à fleurs nombreuses	Juncaceae	(1-2)	
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	Trèfle d'eau	Menyanthaceae	(2-3)	4
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench.	Molinie bleue	Poaceae	3	
<i>Myosotis scorpioides</i> L.	Myosotis des marais	Boraginaceae		
<i>Nardus stricta</i> L.	Nard	Poaceae		
<i>Parnassia palustris</i> L.	Parnassie des marais	Celastraceae	1	
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	Polytric commun	Polytrichaceae		
<i>Potentilla erecta</i> (L.) Räsch.	Potentille dressée	Rosaceae		
<i>Rumex acetosa</i> L.	Grande Oseille	Polygonaceae		
<i>Ranunculus flammula</i> L.	Petite douve	Ranunculaceae		
<i>Salix atrocinerea</i> Brot.	Saule roux	Salicaceae	1	
<i>Salix aurita</i> L.	Petit Marsault	Salicaceae	1	
<i>Salix repens</i> L.	Saule rampant	Salicaceae	(3-4)	
<i>Sanguisorba officinalis</i> L.	Grande pimprenelle	Rosaceae		
<i>Silene flos-cuculi</i> (L.) Clairv.	Silène fleur de coucou	Caryophyllaceae		
<i>Sphagnum palustre</i> L.	Sphaigne des marais	Sphagnaceae	2	1
<i>Sphagnum inundatum</i> Russ.	Sphaigne inondée	Sphagnaceae	5	3
<i>Stellaria alsine</i> Grimm	Stellaire alsine	Caryophyllaceae		
<i>Succisa pratensis</i> Moench	Succise des prés	Caprifoliaceae		
<i>Tulipa sylvestris</i> L. subsp. <i>australis</i> (Link) Pamp.	Tulipe du Midi	Liliaceae		
<i>Utricularia</i> sp.	Utriculaire	Lentibulariaceae		
<i>Valeriana dioica</i> L.	Valériane dioïque	Caprifoliaceae		
<i>Vaccinium microcarpum</i> (Turcz. ex Rupr.) Schmalh.	Canneberge à petits fruits	Ericaceae		
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	Airelle	Ericaceae		
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	Airelle du mont Ida	Ericaceae		
<i>Veronica scutellata</i> L.	Véronique à écus	Plantaginaceae	1	1
<i>Viola palustris</i> L.	Violette des marais	Violaceae	2	1

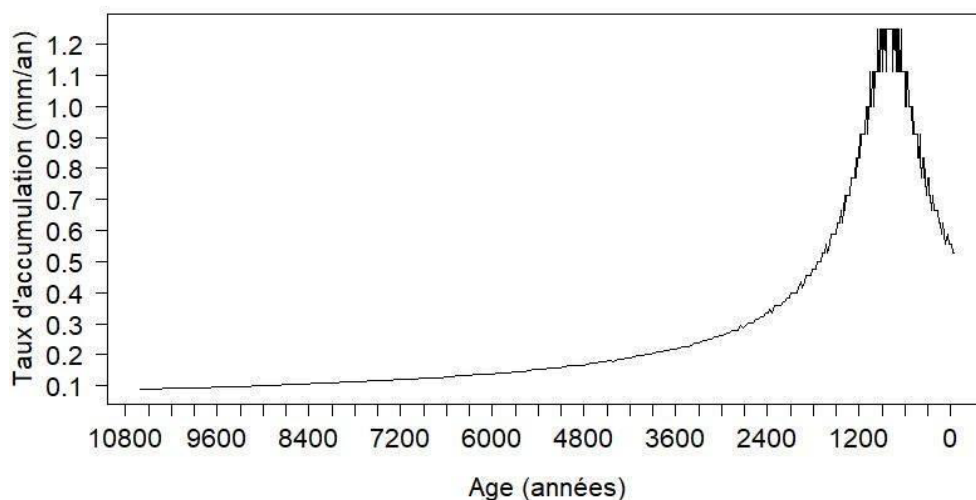


Figure 3. Taux d'accumulation sédimentaire (TAS), d'après Charieau & Larrieu (2021) et D'Oliveira & Zitouni (2021)

Les Poaceae sont bien présentes dans cette zone, avec un maximum de 21% à 168 cm. On note des occurrences d'autres herbacées, comme les Amaranthaceae (6%), les Apiaceae (2%), les Cyperaceae (1%) et les Ericaceae (2%).

126-1 cm (1320 cal. BP-actuel)

La zone 3 correspond à la période du Moyen-Âge jusqu'au présent. Les plantes herbacées sont dominantes, à l'exception de *Pinus* qui augmente très fortement (62%) en surface. Les Poaceae sont présentes en majorité entre 126 et 42 cm, avec un pic à 35%. On observe également un pic de *Q. ilex-coccifera* à 21%. *Castanea* est toujours présent, mais il diminue en surface, comme les autres pollens arboréens. Les herbacées disparaissent, à l'exception d'*Artemisia* qui réapparaît à 7% en surface.

Le taux de pollen indéterminé est élevé (20-27%) pour toutes les profondeurs. La richesse pollinique (Fig. 4) varie entre 9 et 17 taxons. La courbe PA/PNA, qui représente le ratio entre pollen arboréen et non arboréen, varie entre 32 et 86%. A l'exception du niveau

basal (298-299 cm), ce ratio excède 50% pour tous les niveaux.

DISCUSSION

1- Représentation des données

Les résultats sont présentés en pourcentages (Fig. 4), ce qui présente l'avantage de mettre les taxons en interrelation. Mais il aurait été intéressant d'avoir des données calculées en concentration (en grains.cm⁻³), afin de rendre compte de la quantité de pollen présent dans chaque échantillon. La concentration a cependant le désavantage d'être dépendante du taux d'accumulation (production, compaction, décomposition). L'influx (en grains.cm⁻².an⁻¹) aurait permis de résoudre ce problème. L'analyse en laboratoire a été écourtée en raison du confinement, avant que nous ayons compté le nombre prévu de lignes par lame. Or, ce paramètre est indispensable au calcul des concentrations. Elles n'ont donc pas pu être calculées.

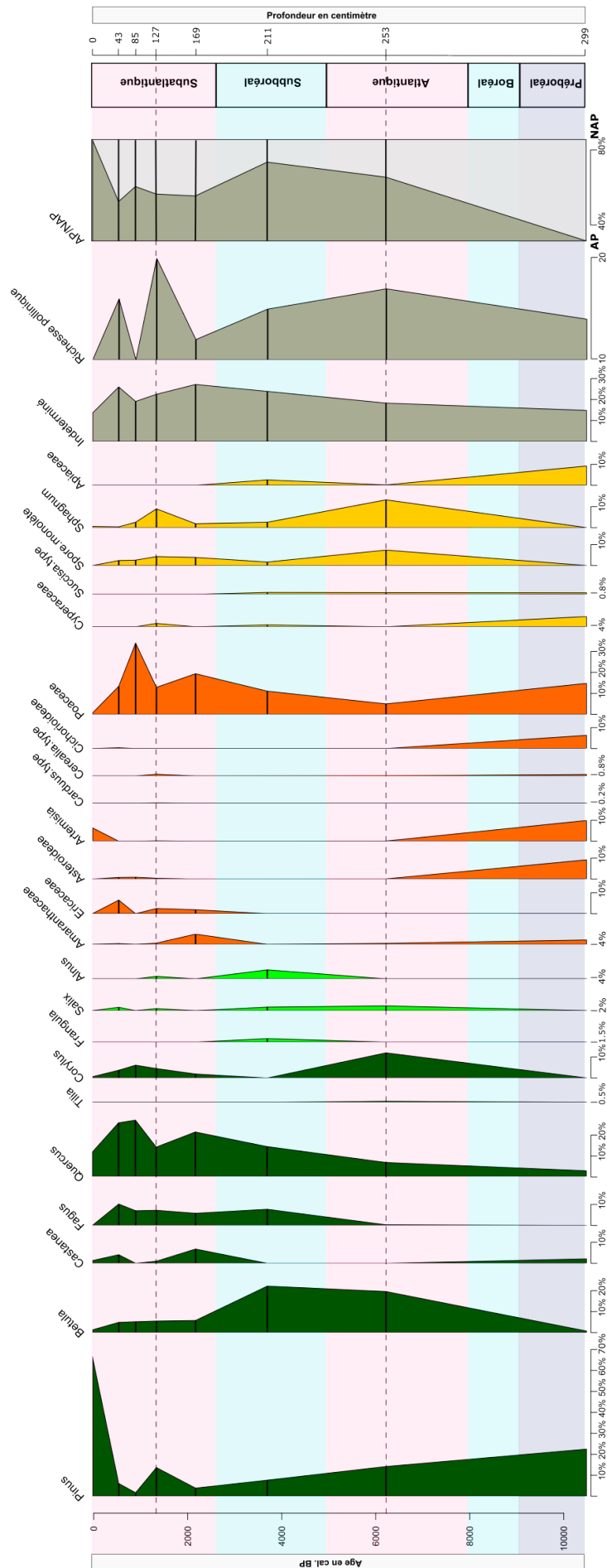


Figure 4. Diagramme pollinique de la tourbière du Peschio. Les couleurs différencient les arbres régionaux (vert foncé), les arbres locaux (vert clair), les herbacées régionales (orange) et les herbacées locales (jaune orangé).

2- Relation pollen-végétation

Le relevé phytosociologique (Table 2) et l'enregistrement pollinique de surface (Fig. 4) ne coïncident pas totalement. La majorité des taxons étudiés sont régionaux et donc absents du relevé phytosociologique de la tourbière (Cornet & Wales, 2020). C'est notamment le cas de *Pinus* et de *Quercus pubescens*-type. Ces taxons régionaux sont caractérisés par de bonnes dispersion (de Beaulieu & Pons, 1979 ; Brugiapaglia et al., 1998 ; Baron et al., 2005) et production polliniques (en particulier, *Pinus* ; de Beaulieu & Pons, 1979).

Le relevé phytosociologique (Table 2) permet d'identifier les taxons locaux, présents aujourd'hui sur la tourbière. Certains sont retrouvés dans les enregistrements polliniques, mais parfois avec des abondances très différentes de leur abondance réelle. Il y a par exemple beaucoup de sphaignes inondées sur le site (recouvrement > 75% ; Table 2), mais seulement 1% de leurs spores ont été observées en surface (Fig. 4). L'enregistrement des Cyperaceae est encore plus problématique : alors qu'elles sont très abondantes sur la tourbière, le diagramme n'en indique aucune en surface (Fig. 4). Les Cyperaceae ont un faible pouvoir de dispersion (Brugiapaglia et al., 1998), mais cela ne devrait pas poser de problème puisqu'elles se développent localement. Ces distorsions de l'enregistrement pollinique pourraient traduire une dégradation des assemblages polliniques, susceptible de détruire les grains de pollen les plus fragile. Toutefois, le fait que ces taxons soient bien enregistrés dans les diagrammes polliniques antérieurs (par exemple, de Beaulieu & Pons, 1979) suggère plutôt que leur faible enregistrement dans nos comptages résulte de problèmes d'identification. Ces deux taxons sont en effet difficiles à reconnaître.

3- L'enregistrement pollinique d'une steppe tardiglaciaire

Les analyses des niveaux compris entre 298 et 252 cm de profondeur (10 381-6145 cal. BP ; Annexe 2) montrent la dominance des taxons

herbacés (Apiaceae, *Artemisia*, Cyperaceae, Poaceae). L'abondance d'*Artemisia* et des Poaceae au Préboréal a déjà été notée par de Beaulieu & Gilot (1972), qui l'interprètent comme traduisant la persistance à haute altitude de lambeaux d'une steppe aride et froide, qui aurait été présente durant le Tardiglaciaire. De Beaulieu & Pons (1979) et Reille (1988) identifient également ces steppes relictuelles dans les tourbières du Peschio et des Nassettes, respectivement. Toutefois, jusqu'à l'an dernier, aucun dépôt sédimentaire ou tourbeux antérieur au Préboréal n'avait été étudié dans les Cévennes. L'étude de Cornet & Wales (2020), réalisée dans le cadre d'ORPAM 2020, a été la première à présenter des données concernant le Tardiglaciaire. Réalisé dans la tourbière des Nassettes, sur le Mont Lozère, ce travail confirme l'existence, au Dryas récent, d'une steppe/toundra froide, dominée par *Artemisia* et des Poaceae.

Les nouveaux âges obtenus (Annexe 2) montrent que la tourbière du Peschio est plus récente que celle des Nassettes, puisque son âge basal est estimé à 10 660-10 430 cal. BP (Table 1). L'enregistrement de l'Holocène ancien y est toutefois nouveau, puisque les diagrammes antérieurs ne couvrent que 5000 à 6000 ans (De Beaulieu & Pons, 1979 ; Pulido Avila, 2006). L'enregistrement pollinique du niveau basal (Fig. 4) confirme la présence de vestiges de la steppe tardiglaciaire à *Artemisia* et Poaceae, qui ont persisté sur les sommets cévenols pendant le Préboréal.

4- Dynamique postglaciaire de la végétation régionale

Nos résultats (Fig. 4) enregistrent bien les dynamiques de *Corylus*, *Fagus* et *Pinus* décrites dans la littérature. Au Préboréal et au début de l'Atlantique (10 381-6145 cal. BP), *Pinus* est encore présent à l'échelle régionale (de Beaulieu, 1974). *Corylus* apparaît antérieurement à 6280-6020 cal. BP (Fig. 4) : Reille (1988) montre que cette apparition caractérise le Boréal, malheureusement non étudié ici. *Quercus pubescens*-type, associé à *Tilia*, domine les assemblages polliniques d'il

y a 6000 ans, ce qui traduit bien la prééminence de la chênaie diversifiée de l'Atlantique (de Beaulieu, 1974 ; Reille, 1988). La présence de *Tilia* durant l'Atlantique traduit des conditions plus humides et plus chaudes qu'aujourd'hui (de Beaulieu & Gilot, 1972). *Fagus* apparaît dans notre diagramme à 3790-3530 cal. BP, au Subboréal (Fig. 4), mais là encore, la résolution temporelle de notre étude est insuffisante pour dater précisément cet événement, dont l'âge a été évalué autour de 5000 cal. BP par Pulido Avila (2006). L'enregistrement de *Fagus* est plutôt stable et n'excède pas 8% dans nos données, ce qui est faible si on les compare aux études antérieures. La hêtraie a en effet régné sur la végétation du Mont Lozère depuis son apparition jusqu'au début de l'époque gallo-romaine (de Beaulieu, 1974 ; Reille, 1988). Les études de de Beaulieu & Pons (1979) et Brugiapaglia et al. (1998) montrent que le hêtre est paradoxalement mieux enregistré dans des milieux ouverts qu'au sein de sa propre forêt. Les faibles pourcentages de *Fagus* que nous avons relevés pourraient donc traduire la présence d'une hêtraie fermée autour du site.

A l'époque gallo-romaine, les paysages se morcellent sous l'effet des déboisement induits par les activités de métallurgie (Baron et al., 2005). Nos résultats (Fig. 4) ne permettent pas de mettre en évidence les défrichements liés aux activités de métallurgie qui sont initiées dès l'Âge du bronze (Ploquin et al., 2010). En revanche, ils révèlent sa disparition des enregistrements polliniques depuis le début de l'époque moderne. Après avoir été quasi-absent durant la presque totalité de l'Holocène, *Pinus* est à nouveau enregistré à partir du début du Moyen-Âge, ce qui correspond au résultat trouvé par Pulido Avila (2006) et traduire la déprise agricole du haut Moyen-Âge (3^e-6^e siècles) induite par les grandes invasions (Latouche, 1947 ; de Beaulieu & Pons, 1979 ; Pulido Avila, 2006). Durant le Moyen-Âge, les herbacées dominent, ce qui traduit la fragmentation du paysage pour les activités agropastorales et métallurgiques (Baron et al., 2005). L'écobuage, pratique consistant à enrichir le

sol pour l'agriculture (Saboulin-Bollena, 1974) grâce aux cendres créées par le brûlage de la végétation, pourrait également être à l'origine de la régression de certaines herbacées (Charieau & Larrieu, 2021). Les pourcentages très élevés de *Pinus* dans le niveau de surface (62% ; Fig. 4) traduit sa présence dans le paysage actuel, à la suite des campagnes de reboisement du 19^e siècle (de Beaulieu & Pons, 1979).

La dominance du pollen arboréen dans l'ensemble du profil étudié (Fig. 4) est logique, car la dynamique végétale régionale a été essentiellement forestière au cours de l'Holocène (Pulido Avila, 2006). De plus, certains taxons, comme *Pinus* (de Beaulieu & Pons, 1979) et *Quercus pubescens*-type (Brugiapaglia et al., 1998 ; Baron et al., 2005), ont une grande capacité de dispersion, entraînant leur surreprésentation dans les assemblages polliniques. On peut enfin noter une occurrence de *Castanea* à la base du sondage. Cette occurrence très ancienne est problématique, car le châtaignier a été introduit en France durant l'Âge du fer. C'est un arbre planté et cultivé (comme le noyer, *Juglans*), qui est lié aux activités anthropiques depuis la période gallo-romaine (Baron et al., 2005). Son enregistrement très précoce (au Préboréal ; Fig. 4) résulte probablement d'une erreur d'identification, son pollen pouvant être confondu avec *Lotus*, représenté localement par *L. pedunculatus*. Sa deuxième occurrence à 168 cm (début de l'époque gallo-romaine) correspond plus probablement à sa véritable apparition régionale (de Beaulieu, 1974).

CONCLUSION

Notre étude a permis de mettre en lumière certains aspects notables de la tourbière du Peschio. Cette tourbière, beaucoup plus ancienne que ce pensaient De Beaulieu & Pons (1979) et Pulido Avila (2006), a enregistré les vestiges de la steppe tardiglaciaire décrite dans la tourbière des Nassettes par Cornet & Wales (2020). Le profil tourbeux étudié a également enregistré la totalité de la dynamique végétale holocène : pinède préboréale, (corylaie boréale), chênaie

caducifoliée atlantique, hêtraie atlantique et subboréale et anthropisation subatlantique. Le réchauffement climatique du début de l'Holocène a induit les premières phases de cette dynamique, avec le remplacement de la pinède par la corylaie, puis par la chênaie caducifoliée. L'extension de la hêtraie, puis l'ouverture des paysages qui caractérisent la deuxième moitié de l'Holocène traduisent en revanche l'influence des activités agropastorales et métallurgiques. Le travail réalisé sur quelques niveaux montre le potentiel et l'intérêt de la séquence prélevée. Son étude à fin résolution devrait permettre de préciser l'histoire de la végétation régionale, mais surtout de reconstituer l'histoire locale de la tourbière du Peschio.

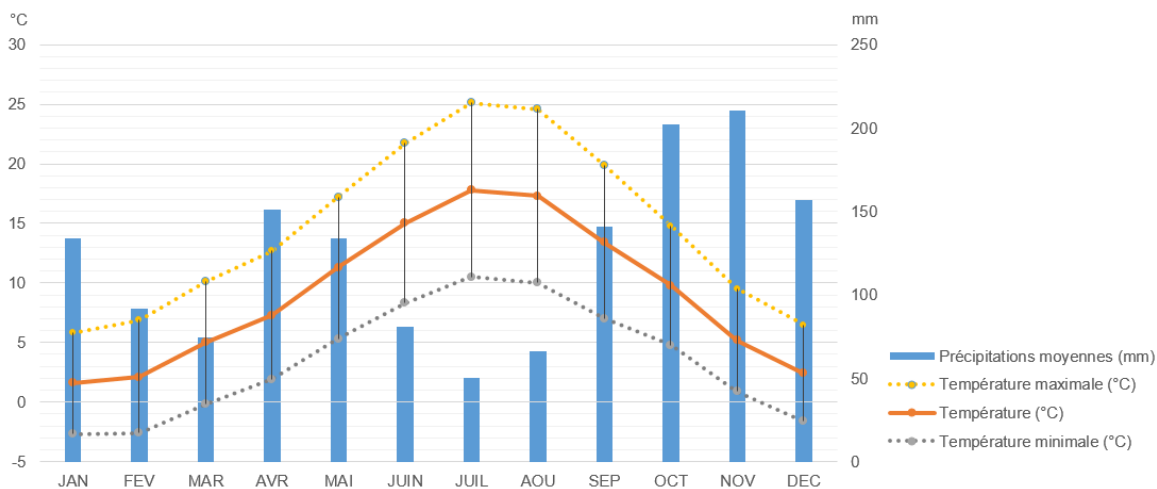
REFERENCES

- Anderson P. & Yalden W. (1981). Increased sheep numbers and the loss of heather moorland in the Peak District, England. *Biological Conservation*, 20 : 195-213.
- Bal M.C., Allée P. & Liard M. (2015). The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses: Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. *Quaternary International*, 366 : 3-14.
- Barbier-Pain D. (2013). Des pollens qui racontent le passé. *Textes et documents pour la classe*, 1058 : 36-37.
- Baron, S., Lavoie M., Ploquin A., Carignan J., Pulido M. & de Beaulieu J.-L. (2005). Record of Metal Workshops in Peat Deposits: History and Environmental Impact on the Mont Lozère Massif, France. *Environmental Science & Technology*, 39 (14) : 5131-5140.
- Berglund B.E. & Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. In : B.E. Berglund (eds.), *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Chichester, UK, pp. 84-455.
- Birks H.J.B. (1996). Contributions of Quaternary palaeoecology to nature conservation. *Journal of Vegetation Science*, 7 : 89-98.
- Bonin G. & Romane F. (1996). Chêne vert et chêne pubescent : histoire, principaux groupements, situation actuelle. *Forêt méditerranéenne*, 17 (3) : 119-128.
- Brugiapaglia E., de Beaulieu J.-L., Guiot J. & Reille M. (1998). Transect de pluie pollinique et étagement de la végétation dans le massif du Taillefer (Isère, France). *Géographie physique et Quaternaire*, 52 (2) : 209-218.
- Brooks J. & Shaw G. (1978). Sporopollenin: A review of its chemistry, palaeochemistry and geochemistry. *Grana*, 17 (2) : 91-97.
- Carrión Y., Kaal J., López-Sáez J.A., López-Merino L. & Martínez Cortizas A. (2010). Holocene vegetation changes in NW Iberia revealed by anthracological and palynological records from a colluvial soil. *The Holocene*, 20 (1) : 53-66.
- Charieau F. & Larrieu M. (2021). Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 57-74.
- Conservatoire des sites lozériens (2018). *Tourbière des Sagnes et du Peschio*. INPN, SPN-MNHN, Paris, 7 p.
- Cornet F. & Wales A. (2020). Reconstitution des paléo-incendies du Mont Lozère (Cévennes, France) du Tardiglaciaire à nos jours. *Orpalm Synthesis*, 13 (1) : 9-24.
- David R. (2014). *Modélisation de la végétation holocène du nord-ouest de la France : reconstruction de la chronologie et de l'évolution du couvert végétal du Bassin parisien et du Massif armoricain*. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, 285 p.
- de Beaulieu J.-L. & Gilot E. (1972). Végétations holocènes du Mont-Lozère : Analyses polliniques et datages. *Comptes rendus Académie des Sciences*, 274 : 1641-1644.
- de Beaulieu J.-L. (1974). Évolution de la végétation sur la bordure montagneuse cévenole au postglaciaire, d'après les pollens. *Bulletin de la Société Languedocienne de géographie*, 8 : 3-4.
- de Beaulieu J.-L. & Pons A. (1979). Recherches pollen-analytiques sur l'histoire de l'action humaine dans la région du Parc

- National des Cévennes. *Annales du Parc National des Cévennes*, 1 : 101-128.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1985). Recherches pollen-analytiques sur l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation des Monts d'Aubrac (Massif Central, France). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 44 : 37-80.
- de Beaulieu J.-L. (1982). Palynological subdivision of the Holocene in France. Chronostratigraphic subdivision of the Holocene. *Striae*, 16 : 106-110.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1987). Histoire de la végétation, du climat et de l'action de l'homme dans le Massif Central français depuis 15 000 ans. *Actes Xe Symposium APLF*, Institut Français de Pondichéry, 25 : 27-32.
- Doche B. (1988). Dynamisme de la végétation après incendie d'une callunaie résistante à la colonisation (étage montagnard granitique du Massif Central). *Documents de cartographie écologique*, 31 : 37-48.
- D'Oliveira L. & Zitouni A. (2021). Dynamique d'accumulation de tourbe dans le sud du Massif Central : focus sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 21-36.
- Firbas F. (1932). Contribution à l'Histoire postglaciaire des forêts des Cévennes Méridionales. *SIGMA*, 15 : 9-16.
- Heinz C. & Thiébaud S. (1998). Characterisation and palaeoecological significance of archaeological charcoal assemblages during Late and Post-Glacial phases in Southern France. *Quaternary Research*, 50 : 56-68.
- Jalut G. (1973). Évolution de la végétation et du climat de l'extrémité orientale des Pyrénées pendant le Tardiglaciaire et le Postglaciaire. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 35 (2) : 55-68.
- Latouche R. (1947). Aspect démographique de la crise des grandes invasions. *Population (French Edition)*, 2 (4) : 681-690.
- Lemee G. (1942). Recherches sur l'histoire forestière postglaciaire en Auvergne. III. Modifications forestières et climatiques dans les Monts Dore d'après l'analyse pollinique. *Bulletin de Revue des Sciences Naturelles d'Auvergne*, 8 : 84-125.
- Lemee G. (1943). L'évolution forestière postglaciaire du Mont-Lozère d'après l'analyse pollinique des tourbières. *Comptes Rendus Sommaire des Séances de la Société de Biogéographie*, 20 : 20-32.
- Mangerud J., Andersen S.T., Berglund B.E. & Donner J.J. (1974). Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas*, 3 : 109-128.
- Muller S.D. (2002). Influence de la végétation sur l'accumulation de la tourbe au Québec méridional. *Comptes Rendus Biologies*, 325 : 629-640.
- Muller S.D. (2005). Pléistocène et Holocène, des glaciations à aujourd'hui. *La Garance Voyageuse*, 71 : 63-69.
- Nègre R. (1972). *La végétation du Bassin de l'One (Pyrénées-Orientales). IV. Les Forêts*. Veröffentlichungen des geobotanischen Institutes des ETH. Stiftung Rübel, Zürich, 49. Heft, 128 p.
- Packham J.R., Thomas P.A., Atkinson M.D. & Degen T. (2012). Biological Flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. *Journal of Ecology*, 100 (6) : 1557-1608.
- Ploquin A., Allée P., Bailly-Maître M.C., Baron S., de Beaulieu J.-L., Carignan J., Laurent S., Lavoie M., Mahé Le Carlier C., Paradis S., Peytavin J. & Pulido M. (2010). PCR - Le Plomb argentifère ancien du Mont Lozère (Lozère). À la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes. *Archeosciences*, 34 : 99-114.
- Pulido Avila M.G. (2006). *Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique postglaciaire de la végétation dans le sud du Massif Central, France*. Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne, Aix-Marseille, 308 p.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G. & Gauberville C. (2008). *Flore forestière française, région méditerranéenne*. Guide écologique illustré, Paris, 2432 p.
- Reille M. (1988). Analyse pollinique de la tourbière des Nassettes, Mont Lozère (France). Réponse à quelques questions

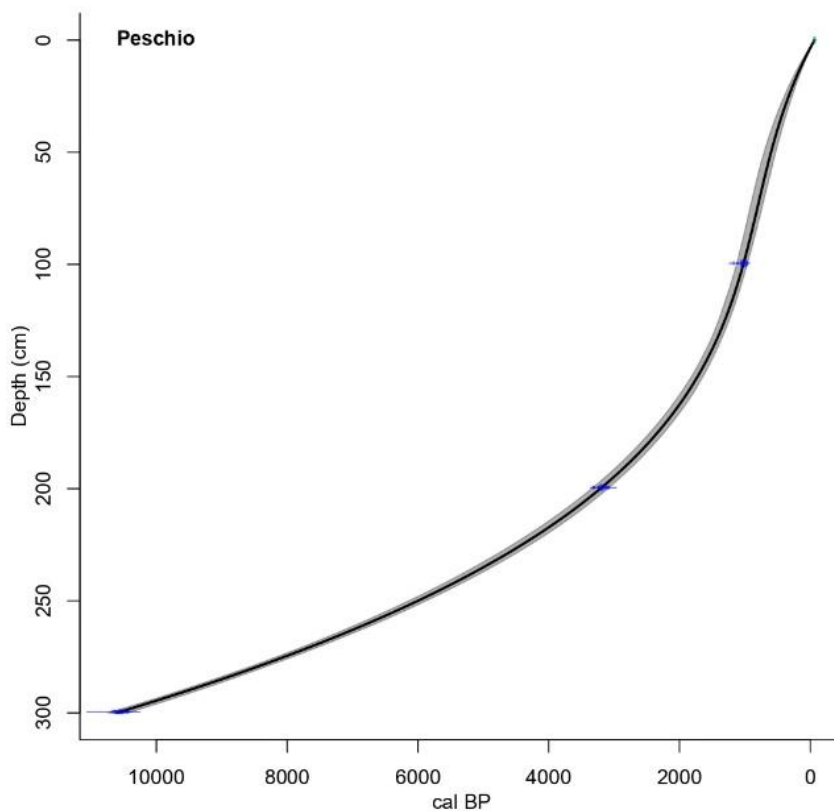
- biogéographiques. *Revue du Gévaudan*, 2 : 3-7.
- Reille M. (1990). *Leçons de palynologie et d'analyse pollinique*. CNRS, 204 p.
- Reille M. & Lowe J.J. (1993). A re-evaluation of the vegetation history of the eastern Pyrenees (France) from the end of the last glacial to the present. *Quaternary Science Reviews*, 12 (1) : 47-77.
- Reille M., 1995. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Supplément 1*. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 327 p.
- Reille M., Andrieu V. & de Beaulieu J.-L. (1996). Les grands traits de l'histoire de la végétation des montagnes méditerranéennes occidentales. *Écologie*, 27 (3) : 153-169.
- Reille M., 1998. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Supplément 2*. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 530 p.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Lawrence Edwards R., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Marian Scott E., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A. & Talamo S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62 (4) : 725-757.
- de Saboulin-Bollena R. (1974). Les écobuages en Lozère. *Revue forestière française*, 1 : 117-121.
- Servera Vives G., Miras Y., Riera S., Julià R., Allée P., Orengo H., Paradis-Grenouillet S. & Palet J.M. (2014). Tracing the land use history and vegetation dynamics in the Mont Lozère (Massif Central, France) during the last 2000 years: The interdisciplinary study case of Countrasts peat bog. *Quaternary International*, 353 : 123-139.
- Stuiver M. & Reimer P.J. (1993). Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- Tinner W., Conedera M., Ammann B. & Lotter A. F. (2005). Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *SAGE Journals*, 15 (8) : 1214-1226.
- Vannière B. & Martineau R. (2005). Histoire des feux et pratiques agraires du Néolithique à l'âge du Fer en région Centre (France) : implications territoriales, démographiques et environnementales. *Gallia Préhistoire - Archéologie de la France préhistorique*, 47 : 167-186.

ANNEXE 1. Diagramme ombrothermique du Mont Lozère. Normales mensuelles de 1981 à 2010, Source : Météo France, Le-Pont-de-Montvert (48), 875 m, 44°21'54"N, 03°44'18"E



ANNEXE 2. Dates radioarbone et modèle d'âge de la carotte de la tourbière du Peschio (d'après Charieau & Larrieu, 2021)

Code labo	Profondeur (cm)	Age (BP)	Age (cal. BP)
Poz-130010	99-100	1125 ± 30	1170 - 960
Poz-130011	199-200	3000 ± 30	3330 - 3070
Poz-130012	298-299	9340 ± 30	10660 - 10430



ANNEXE 3. Protocole de Berglund et Ralska-Jasiewiczova

Le volume de chaque échantillon est mesuré par déplacement d'eau (10 ml d'eau distillée) dans des éprouvettes graduées. Les échantillons sont mis en suspension dans l'eau distillée à l'aide d'agitateurs et le volume final est relevé.

Les échantillons sont centrifugés pendant 5 minutes à 3000 tours/min et le surnageant est éliminé. Durant tout le traitement, toutes les centrifugations sont effectuées avec ce réglage (5 minutes à 3000 tours/minute).

10 ml d'acide chlorhydrique à 20% sont ajoutés à chaque échantillon pour éliminer les carbonates. Une nouvelle centrifugation est effectuée et le surnageant est de nouveau éliminé. De l'eau distillée est ajoutée pour rincer les échantillons et ils sont centrifugés et le surnageant est éliminé.

Afin d'éliminer les acides humiques, de l'hydroxyde de potassium à 10% est ajouté aux échantillons et les échantillons sont placés dans un bain-marie à 90°C pendant 20 min et mélangés régulièrement à l'aide d'agitateurs. Les échantillons sont vidés sur des tamis métalliques posés sur des béchers de 50 ml et grâce à des jets d'eau distillée, tout le matériel fin est récupéré. Trois rinçages suivis de centrifugation ont été nécessaires pour obtenir un surnageant clair.

Pour éliminer la silice, de l'acide fluorhydrique à 70% (entre 5 et 8 ml) est ajouté aux échantillons qui sont agités. Les échantillons reposent pendant une nuit (12 h). Ensuite, les échantillons sont agités et dilués avec de l'eau distillée puis centrifugée et le surnageant est éliminé.

Pour éliminer les fluosilicates qui forment un gel qui diminue la visibilité sur la lame, et acidifier les échantillons, de l'acide chlorhydrique à 20% (entre 8 et 10 ml) est ajouté et les échantillons sont placés dans le bain-marie à 100°C pendant 10 min puis centrifugés et le surnageant est éliminé.

Pour préparer les échantillons à l'étape de l'acétolyse, ils doivent être déshydratés. De l'acide acétique (8-10 ml) est ajouté aux échantillons suivis d'une agitation. Les échantillons sont centrifugés et le surnageant est éliminé.

Une fois les échantillons déshydratés, la cellulose encore présente dans les échantillons est éliminée par acétolyse. Le liquide acétolysant est préparé en utilisant 45 ml d'anhydride acétique à 97% et 5 ml d'acide sulfurique à 98% dans une éprouvette graduée. 5-8 ml de liquide acétolysant est ajouté à chaque échantillon, puis ils sont placés pendant 2 minutes dans un bain-marie à 100°C. L'agitation est constante. Pour stopper la réaction, de l'acide acétique est ajouté puis, lorsque le liquide acétolysant est assez dilué, un peu d'eau froide est ajoutée pour complètement stopper la réaction. Les échantillons sont centrifugés et le surnageant est éliminé.

Les échantillons sont rincés à l'eau distillée (8 à 10 ml) puis à l'alcool (8 à 10 ml). Pour chaque rinçage, les échantillons sont agités et centrifugés, et le surnageant est éliminé.

Le matériel pollinique est ensuite transféré dans les piluliers à l'aide de micropipettes et d'un peu d'alcool pour faciliter le transfert de tout le matériel. Les piluliers sont centrifugés et le surnageant est éliminé. Les piluliers sèchent pendant quelques minutes (jusqu'à évaporation presque totale de l'alcool) à l'envers. Pour finir, quelques gouttes de glycérine sont ajoutées dans chaque pilulier.

DYNAMIQUE DES FEUX SUR LE MONT LOZERE DURANT LE DERNIER MILLENAIRE : ETUDE DES CHARBONS DE BOIS DANS LA TOURBIERE DU PESCHIO

Flavie Charieau ¹, Marie Larrieu ²

*Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (UMR 5554)
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France*

¹ flavie.charieau@gmail.com, ² marie.larrieu2@orange.fr

Encadrement : Laurent Bremond

Citation : Charieau F. & Larrieu M. (2021). Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 55-72.

Résumé : L'étude des particules de charbons sédimentaires de la séquence de la tourbière du Peschio a permis de caractériser des paléoincendies qui ont affecté les formations végétales et le paysage du Mont Lozère. Au cours du dernier millénaire, cinq occurrences de feux ont été mises en évidence. Ces incendies auraient principalement été causés par les activités métallurgiques et agropastorales, importantes au Moyen-Âge, entraînant une forte régression voire la disparition des formations forestières, au profit de zones ouvertes dominées par les herbacées.

Mots clés : paléoincendie, particule charbonneuse, Moyen-Âge, perturbations anthropiques

Abstract: *Fire dynamics on Mont Lozère during the last millennium: microcharcoal study in Peschio peatland.* The study of sedimentary charcoal particles of the Peschio peatland sequence allowed to characterize palaeofires that have affected the plant formations and the landscape of Mont Lozère. During the last millennium, five fire occurrences have been identified. These fires would have been mainly caused by important metallurgical and agropastoral activities in the Middle Ages, causing a sharp decrease, and even the disappearance of forests, at the benefit of open areas dominated by herbaceous plants.

Keywords: palaeofire, charcoal particle, Middle Ages, anthropogenic disturbance

L'Holocène est caractérisé par un climat instable et dynamique marqué par six périodes de changements climatiques rapides (9000-8000 cal. BP ; 6000-5000 cal. BP ; 4200-3800 cal. BP ; 3500-2500 cal. BP ; 1200-1000 cal. BP et 600 à 150 cal. BP), au cours desquelles des refroidissements polaires, une aridité tropicale et des changements dans la circulation atmosphérique ont été enregistrés (Mayewski et al., 2004). Parmi ces intervalles de temps, plusieurs coïncident avec des événements majeurs de d'histoire

des civilisations, mettant en avant l'impact de la variabilité du climat sur le développement de l'Homme au cours de l'Holocène (Mayewski et al., 2004).

Le début de l'Holocène (11500 cal. BP à 8500 cal. BP) est marqué par une forte production de biomasse ligneuse suite à des conditions climatiques favorables (réchauffement rapide) (Miras et al., 2011 ; Rius et al., 2011 ; Feurdean et al., 2013). Cette production de biomasse du début de l'Holocène, associée à un été sec, semble avoir provoqué vers 10500 cal. BP une augmentation de la fréquence des

incendies (Rius et al., 2011 ; Vannière et al., 2015 ; Dietz et al., 2018). La quantité et la qualité de la biomasse, reliée au climat, ont donc pu impacter le régime des incendies (Higuera et al., 2009).

De 9000 à 5000 cal. BP, l'augmentation de la fréquence des incendies est principalement caus e par l'augmentation de la température estivale au cours de l'Holocène – Thermal Maximum (HTM) (Renssen et al., 2009 ; Rius et al., 2011 ; Feurdean et al., 2013). Les variations climatiques ainsi mises en évidence ont longtemps été considérées comme la cause principale de la variabilité des incendies (Vannière et al., 2015). Mais durant les 3000 dernières années, la fréquence des incendies a augmenté, s urement en relation avec le développement d'activités anthropiques (Rius et al., 2011). L'action de l'Homme dès le Mésolithique est un facteur non négligeable des occurrences de feux (Dietz et al., 2018).

Au cours du Mésolithique, on observe la propagation d'un mode vie sédentaire dans l'Ouest et l'Est de l'Europe centrale (Dietz et al., 2018). Cette sédentarisation semble avoir eu un impact majeur sur les formations végétales et les paysages (Rackham et al., 1999 ; Banen & Sabatier, 2003 ; Vannière & Martineau, 2005 ; Colombaroli et al., 2008). Dietz et al. (2018) suggèrent que dès 8500 cal. BP, les chasseurs cueilleurs du Mésolithique ont maintenu une utilisation diversifiée du feu. Par exemple, entre 8000 cal. BP et 6000 cal. BP, soit entre la fin du Mésolithique et le début du Néolithique, on remarque une utilisation importante du feu autour de la mer Baltique, afin de maintenir une production alimentaire et garder les clairières ouvertes pour attirer le gibier (Dietz et al., 2018). L'introduction en Europe de l'agriculture et de l'élevage amène l'Homme à utiliser le feu pour la gestion des terres agricoles, ce qui entraîne une augmentation des incendies (Manen & Sabatier, 2003 ; Vannière & Martineau, 2005 ; Colombaroli et al., 2008 ; Dietz et al., 2018). Durant le Néolithique, on observe une implantation durable du sédentarisme appuyée par des restes subfossiles témoignant de la domestication animale, de l'agriculture ou de

la fabrication de céramique pour le stockage de denrée (Huysecom, 2006).

Durant l'âge du Bronze (4000 cal. BP), de nombreux incendies d'origine anthropique, liés à une utilisation croissante des terres agricoles, sont recensés en Europe centrale (Dietz et al., 2018 ; Nizou et al., 2019). Cette période se traduit par une modification de la gestion des terres et des transitions technologiques, ce qui conduit à une agriculture intensive, avec la culture de petites parcelles et un apport de fertilisants pour l'élevage. (Bouby et al., 2010 ; Galop et al., 2010 ; Dietz et al., 2018). En Europe, les cultures manuelles sur abattis-brûlis des temps préhistoriques, ont évolué en céréaliculture à l'araire durant l'Antiquité (Mazoyer & Roudart, 2014).

Au cours de la période romaine (2000 cal. BP), l'agriculture poursuit sa transition (Dietz et al., 2018), entrainant une expansion progressive des activités anthropiques dans les zones élevées (Nizou et al., 2019). Par conséquent, les paysages et forêts de nombreux reliefs tels que les Pyrénées, les Alpes, ou bien plus localement le Mont Lozère situé dans le Massif Central, sont progressivement exploités par l'Homme (Bal et al., 2015 ; Nizou et al., 2019).

Dans le Massif Central, l'introduction de l'agriculture est semble-t-il précoce (6600-6500 cal. BP ; Miras et al., 2011). Au cours de l'âge du Bronze, les forestiers d'origine humaine semblent progresser et favorisent le pastoralisme (Miras et al., 2011). Ces défrichements s'accentuent pour s'étendre jusque dans les hautes altitudes pendant la période Romaine (ca. 2070 cal. BP), afin de permettre l'extension des pratiques pastorales d j établies pendant l'âge du Bronze.

Sur le Mont Lozère, les pratiques ancestrales d'écobuage ont perduré tout au long de l'Holocène et jusqu'à nos jours (Saboulin Bollena, 1974). Ces incendies volontaires ont conduit à l'épuisement des forêts qui ont été remplacées par des cultures et pâturages (Tinner et al., 2005 ; Carrion et al., 2010 ; Vannière et al., 2015). On observe sur le Mont Lozère, la présence d'activité agropastorale (présence de b taux), ce qui a valu à la zone

des Causses et des Cévennes d'être récemment inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO, sous le nom d'« héritage du paysage pastoral » (Servera Vives et al., 2014). Toutefois, le pastoralisme n'est pas l'unique facteur d'origine anthropique qui a façonné le Mont Lozère. Ce relief, qui était anciennement dominé par de grandes étendues forestières composées de chênes (*Quercus* spp.) et de hêtre (*Fagus sylvatica*) (de Beaulieu et al., 1974 ; Baron et al., 2005 ; Vannière et al., 2015) a été intensément exploité pour l'utilisation de combustible nécessaire aux activités artisanales de fusion et fréquemment incendié pour le développement de l'agro-pastoralisme (Reille, 1988 ; Baron et al., 2005). De nombreux sites d'exploitation minière et des fours ont été retrouvés dans toute la zone du Mont Lozère. Grâce à la datation au radiocarbone utilisée sur les scories des ateliers de métallurgie ainsi que sur des charbonnières, les restes ont pu être datés (Ploquin et al., 2010). Deux périodes principales ont été mises en évidence : de 2250 cal. BP à 1930 cal. BP, et de 950 cal. BP à 650 cal. BP (Baron et al., 2005). Ces périodes correspondent respectivement à l'Âge du Fer et à la fin du Moyen Âge. La zone du Mont Lozère aurait été également exploitée pour ses ressources en galène (minerai de plomb argentifère ; Ploquin et al., 2010).

De nos jours, on associe le régime des incendies dans le Sud de la France, principalement à la saisonnalité. Les étés secs favorisent l'inflammabilité, et la saisonnalité permet la croissance de la biomasse. Toutefois, 95% des incendies restent d'origine humaine, soit plus de 90% de la superficie totale brûlée (Ganteaume et al., 2013).

En effet, les régimes de feux sont dépendants de différents facteurs : le climat, le combustible, les régimes d'allumage ou encore le paysage (Vannière et al., 2015). Les incendies laissent des résidus sous la forme de particules de charbon de bois (composés d'éléments sous la forme élémentaire de carbone inerte) très résistantes et facilement piégées dans les sédiments organiques tapissant les lacs et les tourbières (Lynch et

al., 2004 ; Bhattarai et al., 2019). L'analyse de ces indicateurs carbonisés, confrontée à des études polliniques, permet de rassembler des informations telles que le type d'essences présentes, la nature du paysage, les dates des feux, leurs intensités et fréquences (Clark, 1987 ; Tinner et al., 2005 ; Carrion et al., 2010). L'étude des paléo-incendies nécessite donc une approche multi-proxy (Robin et al., 2013) pour rendre compte au mieux de l'ensemble de ces paramètres. Au fil du temps, l'évolution des méthodes d'analyse de ces charbons a permis une meilleure compréhension des événements et des processus à l'origine des paléo-incendies. Une analyse stratigraphique de sédiments contenant des charbons peut informer sur les occurrences de feux, les changements de climat et de végétation dans de larges échelles temporelles (Lynch et al., 2004). La taille des particules sédimentaires de charbons est également un paramètre qui nous permet de déterminer la distance parcourue par ces particules (Patterson, 1987). Les grandes particules de charbons (plus lourdes) seront transportées sur une distance moins longue par rapport à la source de l'incendie. A l'inverse, des petites particules de charbons (plus légères) peuvent être transportées loin de la source de l'incendie (Patterson, 1987).

L'analyse des dépôts sédimentaires de ces charbons est un précieux outil pour comprendre la dynamique des feux sur le long terme (Lynch et al., 2004). C'est donc en étudiant les dépôts de charbons dans les sédiments de la tourbière du Peschio (Mont Lozère) que nous tentons dans cette étude, de contribuer à caractériser la dynamique des feux du dernier millénaire, dans le sud du Massif Central.

MATERIEL ET METHODES

1- Contexte géologique, anthropique et écologique de la zone d'étude

Le Mont Lozère se situe dans le sud-est du Massif Central, plus précisément dans le Parc National des Cévennes (Pulido Avila, 2006 ; Bal et al., 2015). Il constitue la limite sud du Massif Central ainsi que la limite nord des

plaines Languedociennes (Servera Vives et al., 2014). Ce massif granitique orienté Nord-Ouest - Sud-Est, vieux de 300 millions d'années (Cosandey & Didon-Lescot, 1990), s'étend sur 30 km et culmine entre 900 à 1700 m d'altitude (Servera Vives et al., 2014 ; Bal et al., 2015). Le Mont Lozère est soumis à un climat montagnard avec des influences d'origine méditerranéenne sur le versant sud. La mer Méditerranée joue un rôle dans la formation de dépressions au printemps et en automne, ce qui génèrent des épisodes intenses de précipitations (épisodes cévenols), pouvant engendrer d'importantes crues (Cosandey & Didon-Lescot, 1990 ; Servera Vives et al., 2014). Le régime océanique sous lequel sont soumises les zones occidentales et septentrionales du massif du Mont Lozère, offre des précipitations plus régulières tout au long de l'année. La température annuelle moyenne est de 3,2°C avec des précipitations annuelles moyennes de 1600 mm, hauteur de précipitations très fluctuantes d'une année à l'autre. La zone méridionale est en moyenne plus arrosée par effet de Foehn (Servera Vives et al., 2014).

Notre zone d'étude, la tourbière du Peschio (44.464774°N, 3.634056°E), se localise sur le flanc Nord-Ouest du Mont Lozère à environ 1320 m d'altitude. Elle s'étend sur une longueur de 500-700 m, pour une largeur de 700-800 m (Pulido Avila, 2006). C'est une tourbière minérotrophe plane qui reçoit des eaux enrichies en minéraux par les substrats environnants (Pulido Avila, 2006). D'après les données de D'Oliveira & Zitouni (2021) et la succession hydrosérale établie par Muller (2002), notre tourbière se caractérise comme un fen. Toutefois, nous ne pouvons préciser s'il s'agit d'un fen riche ou pauvre (D'Oliveira & Zitouni, 2021).

Actuellement, la tourbière est entourée par des collines où domine le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le bouleau (*Betula alba*). Le frêne élevé (*Fraxinus excelsior*) est également relativement bien présent. Des buttes à Callune (*Calluna vulgaris*), caractérisent la bordure de la tourbière. Au sein de la tourbière, les sphaignes (*Sphagnum* spp.) et la laiche brune (*Carex nigra*) sont les espèces

dominantes (Pulido Avila, 2006). Cependant, la construction d'une digue au Moyen Âge semble avoir eu un impact sur la végétation qui apparaît très différente de celle que l'on observe au sein de tourbières naturelles de la région (Pulido Avila, 2006). La digue a entraîné l'enneigement de la zone et de la tourbière préexistante (Pulido Avila, 2006). De plus, le Peschio est situé dans une cuvette, ce qui le rend vulnérable aux crues provoquées par les pluies cévenoles, qui façonnent la végétation singulière qui la compose (Pulido Avila, 2006).

2- Méthodes

Profondeur de la tourbière

Afin de déterminer la zone la plus profonde et par conséquent, localiser les dépôts potentiellement les plus anciens de la tourbière, nous avons réalisé des sondages sur plusieurs transects orientés Nord-Est / Sud-Ouest. Tous les 20 m, une tige en métal a été enfoncée dans la tourbe jusqu'au substratum pour évaluer les variations de la profondeur de la tourbière. L'ensemble de la tourbière n'a pas pu être sondée dans sa totalité par manque de temps et de par sa superficie trop importante.

Réalisation du carottage

Une profondeur d'environ 300 cm a été mesurée lors du sondage de la zone (44.464774°, 3.634056°) avec la tige en métal. Quatre tronçons de 1 mètre de long ont été réalisés en quinconce à l'aide d'un carottier russe (Jowsey, 1966), pour un prélèvement complet de 300 cm, avec 10 cm de sédiments communs pour chaque tronçon, hormis pour la #PES-2020-B2 (80 cm), afin de ne pas tasser les sédiments et perdre de l'information (Fig. 1). Par la suite, chaque tronçon a été enroulé dans du cellophane pour éviter qu'il ne se dessèche et a été placé délicatement dans un tube en PVC pour le transport. Dès notre retour au laboratoire, les échantillons ont été placés dans un réfrigérateur (4°C) pour éviter toute détérioration des restes organiques.

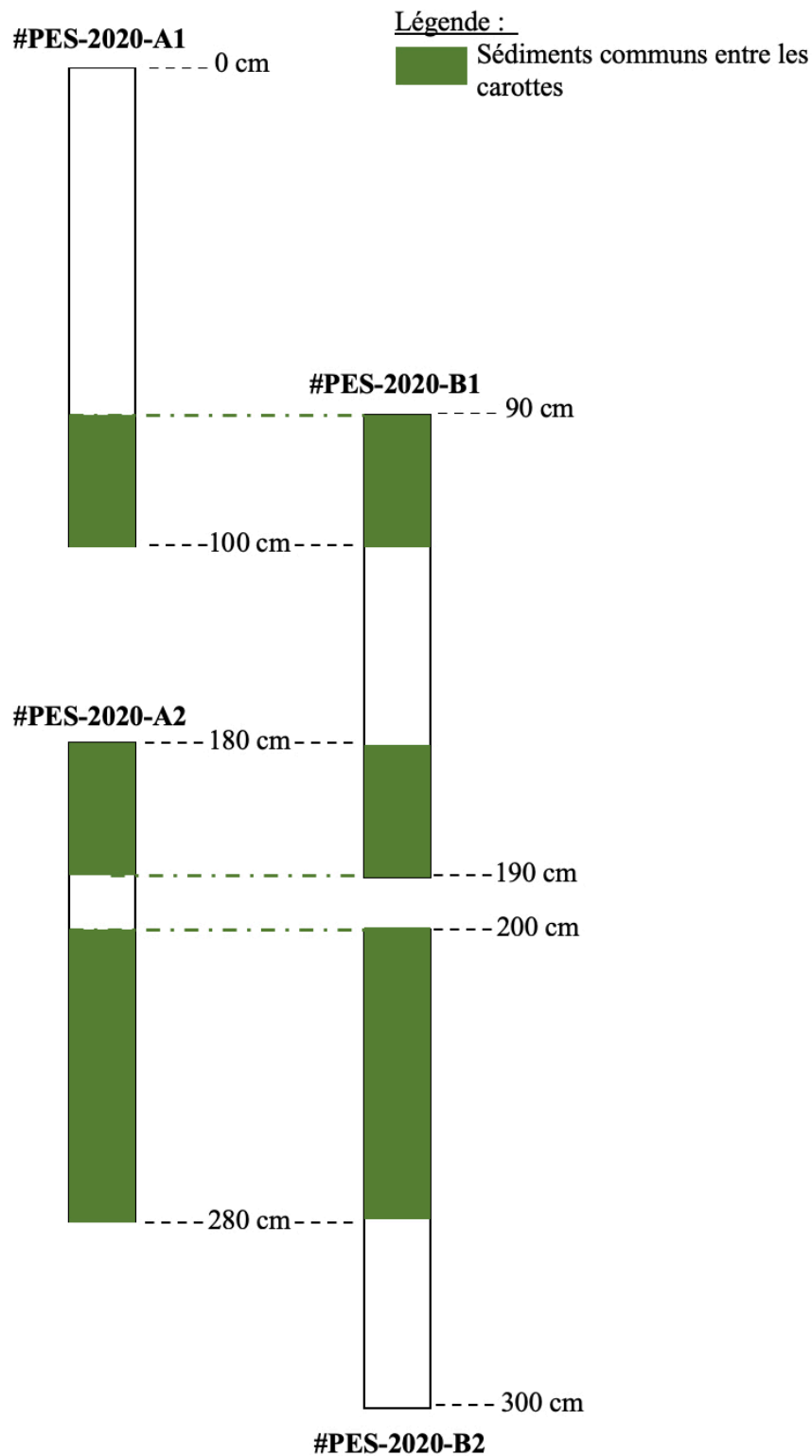


Figure 1. Schéma synthétique décrivant l'extraction de tourbe

Réalisation du modèle d'âge des prélèvements sédimentaires
 Une datation au radiocarbone a été réalisée

sur un échantillon de 1 cm³, prélevé à la base des sédiments de la tourbière. Par la suite, cette datation au radiocarbone a permis de

mettre en place un modèle d'âge à l'aide du package Clam © sur R (Blaauw, 2010) pour fournir des âges calibrés (cal. BP) sur l'ensemble de la séquence étudiée.

Prélèvements des échantillons et analyse des charbons

Des prélèvements ont été réalisés sur les carottes #PES-2020-A1 et #PES-2020-B1 d'un volume de 0,5 cm³ avec un emporte-pièce circulaire de manière continue tous les 1 cm. Les 190 prélèvements obtenus ont été plongés individuellement dans des piluliers contenant une solution d'hydroxyde de potassium (KOH), de métaphosphate (NaPO₃) et d'hypochlorite de sodium (eau de javel, NaClO) pour dissoudre la matière organique. Après cette opération, les piluliers ont été placés dans une caisse disposée sur une plaque mouvante pendant 1 semaine dans le but de mélanger leur contenu et de détacher le maximum de restes organiques des macro-charbons.

Lors des comptages réalisés une semaine plus tard, le contenu des piluliers a été tamisé (160 µm) afin de retirer le maximum de particules organiques et de ne garder que les macrocharbons (Carcaillet et al., 2001). Cette méthode permet d'enregistrer le signal produit par les incendies locaux (Lynch et al., 2004).

Le tamis a ensuite été installé sur un socle quadrillé puis placé sous une loupe binoculaire munie d'une caméra afin de commencer le comptage. Le comptage a été réalisé à l'aide de deux personnes qui, dans un premier temps, ont distingué les charbons grâce à leur forme géométrique anguleuse, leur texture et leur apparence brillante. Ensuite, les opérateurs ont procédé à la prise de photos à l'aide d'une caméra reliée à la

loupe binoculaire et les ont exportées sur le logiciel d'analyse d'image *Winseedle* (versions *PRO 2016* et *PRO 2019*; Hennebelle et al., 2020), dans le but d'identifier le nombre de charbons présents ainsi que d'évaluer la superficie et la surface occupée pour chacun d'eux.

Après avoir recueilli l'ensemble des données, le rapport largeur/longueur (l/L) a été calculé pour chaque charbon, avec pour objectif de déterminer le type de particule carbonisée, ainsi que la source, l'intensité du feu et le transport (Lynch, 2004). Selon l'étude de Aleman et al. (2013), un rapport l/L > 0,5 traduit la présence de charbon d'origine ligneux, alors qu'un rapport l/L < 0,5 indique un charbon d'origine herbacée.

Les données ont été traitées et les figures ont été réalisées à partir de Rstudio à l'aide des packages stats, dbplyr, MASS et data.table.

RESULTATS

Nos résultats sont présentés puis discutés, à la lumière du log stratigraphique établi par D'Oliveira & Zitouni (2021), et du rapport pollinique PA/PNA réalisé par Cartier et al. (2021).

1- Modèle d'âge de la tourbière du Peschio

Le modèle d'âge réalisé est basé sur 3 datations radiocarbone (Table 1). Il couvre une période allant de 10 600 cal. BP (3 m de profondeur) à -65 cal. BP (surface) (Fig. 2). A titre de comparaison, le modèle d'âge de la tourbière des Nassettes situé non loin de celle du Peschio, couvre environ 13 280 ans (Cornet & Wales, 2020).

Table 1. Dates radiocarbone de la séquence PES-1. L'étalonnage des dates mesurées (BP) a été réalisé avec le logiciel Calib (Stuiver & Reimer, 1993), en utilisant la base de données de calibration IntCal20 (Reimer et al., 2020).

Site	Code Labo	Prof. (cm)	Age ¹⁴ C (BP)	Age cal. BP
PES	Poz-130010	99-100	1125 ± 30	1170-960
	Poz-130011	199-200	3000 ± 30	3330-3070
	Poz-130012	299-300	9340 ± 30	10660-10430

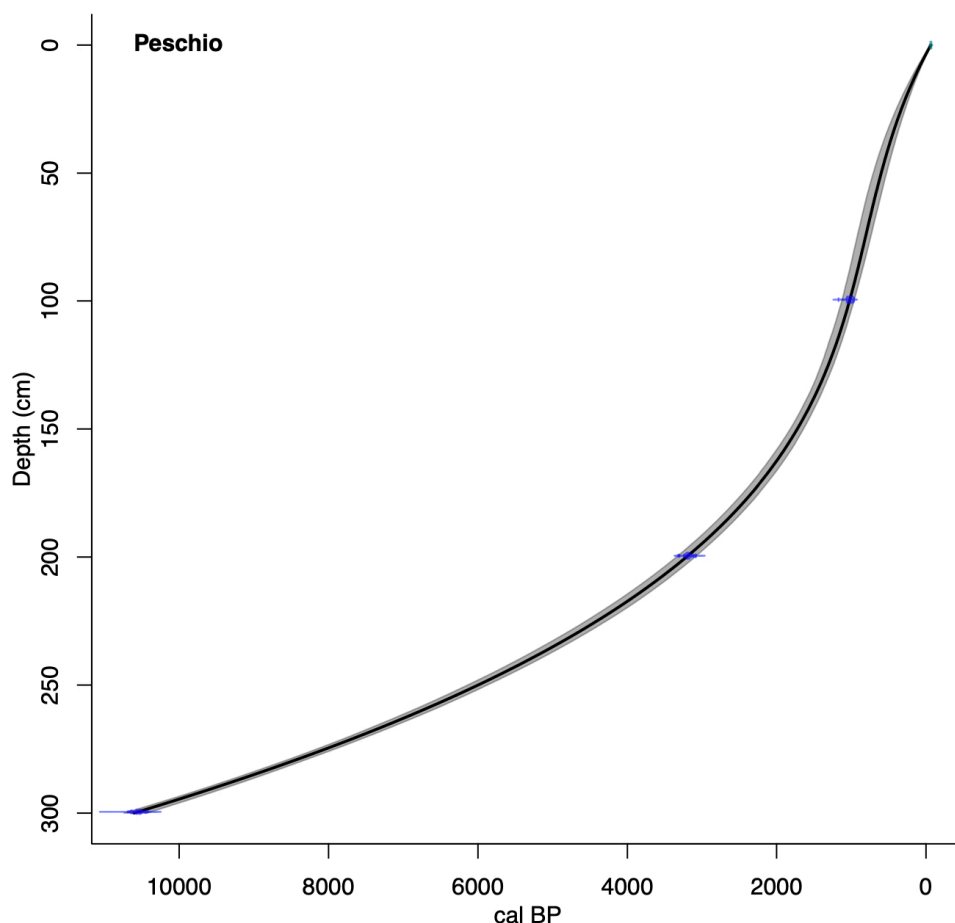


Figure 2. Modèle d'âge de la tourbière du Peschio (réalisé par L. Bremond)

2- Influx de charbon

L'influx de charbon (Fig. 3a) calculé ici à l'aide d'un modèle âge/profondeur présente une amplitude de variation permettant d'identifier la fréquence d'occurrence des feux (Vannière et al., 2005). Sur les 100 centimètres supérieurs, cinq pics de charbon (influx $> 0,1 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$; Clark, 1988; Cornet & Wales, 2020) sont mis en évidence. Ces pics traduisent des événements locaux d'incendie (Lynch et al., 2004) :

- 980 cal. BP [970-1000]. Variation de l'influx : $0,5$ et $1,5 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$,
- 780 cal. BP [770-790]. Variation plus importante, comprise entre $0,5$ et $2,2 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$,

- 690 cal. BP [670-700]. Variation similaire à la première occurrence, de $0,5$ et $1,5 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$,
- 570 cal. BP [560-580]. Variation de l'influx de charbon entre $0,5$ et $2 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$,
- 400 cal. BP [380- 430]. Influx de charbon plus important, entre $0,5$ et $3 \text{ mm}^2.\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$.

L'influx de charbon que l'on peut observer en dehors des occurrences (pics) correspond probablement à du « bruit de fond », c'est-à-dire des charbons qui se sont déposés hors période d'incendies locaux (Clark & Royall, 1996). Les périodes durant lesquelles l'influx de charbons chute et tend vers 0, indique une forte diminution voire l'absence d'incendie (Vannière et al., 2005).

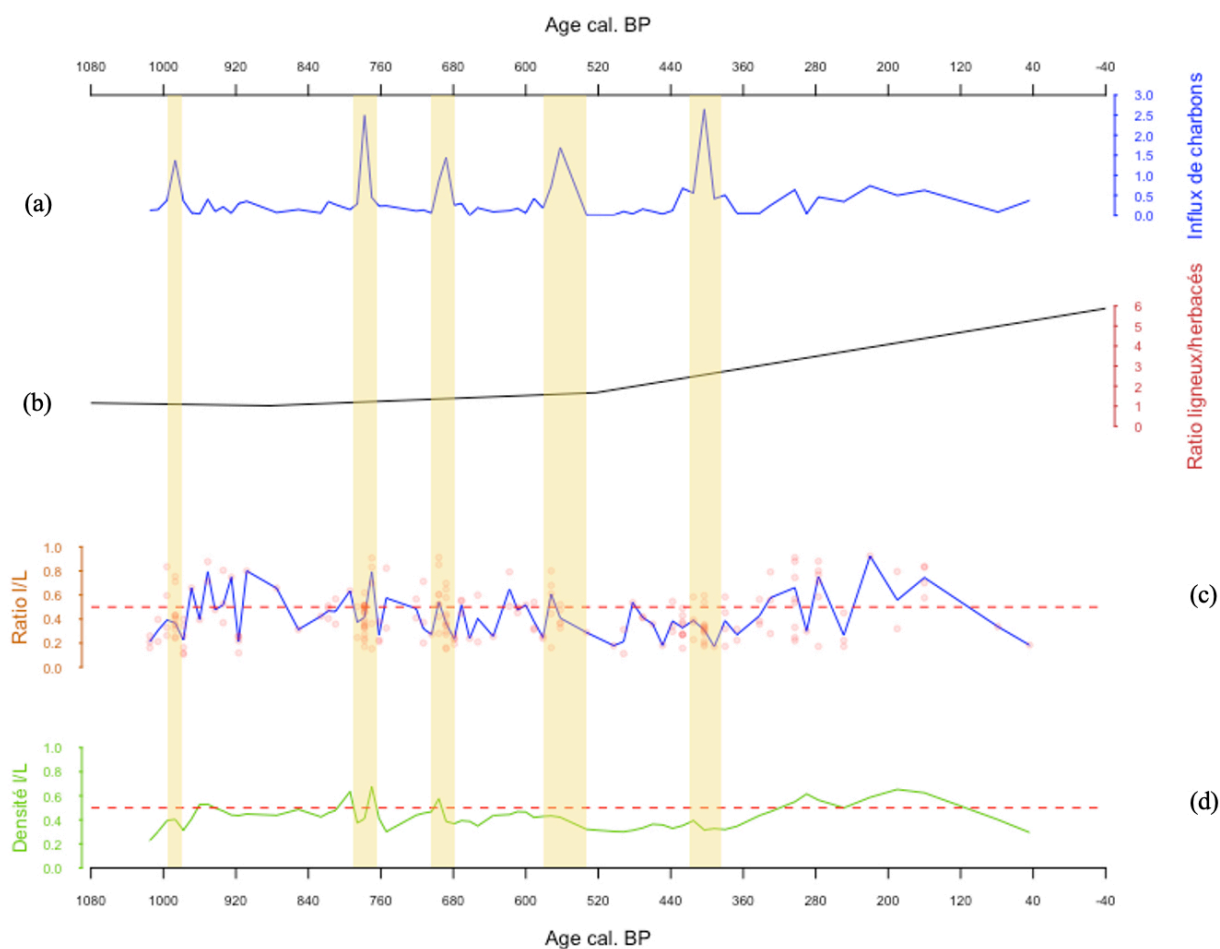


Figure 3. (a) Influx de charbons présents dans la tourbière du Peschio en fonction de l'âge en cal. BP ($\text{mm}^2 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$). (b) Rapport du pollen arboré (PA) sur le pollen non arboré (PNA), à partir des données de [Cartier et al., 2021](#) (en %). (c) Rapport l/L (largeur/Longueur) des charbons du Peschio (en cal. BP) (sans unité). Les points rouges représentent les valeurs de chaque rapport l/L (sans unité) et la courbe bleue correspond au rapport moyen l/L (sans unité) des charbons. (d) Densité du rapport l/L des charbons (sans unité). Les lignes rouges en pointillées séparent les valeurs entre les herbacées et les ligneux. Les barres jaunes représentent les principales occurrences de feux.

3- Morphologie des charbons

L'étude comparée du rapport l/L ([Fig. 3c](#)) avec la densité l/L ([Fig. 3d](#)) et le ratio pollen ligneux/herbacé (PA/PNA ; [Fig. 3b](#)) réalisé par [Cartier et al. \(2021\)](#), nous a permis de dégager le type de combustible utilisé pendant les occurrences des feux.

Au cours de la période du premier incendie enregistré (970-1000 cal. BP), un rapport l/L et une densité l/L inférieure à 0,5 ainsi qu'un rapport PA/PNA égal à 10, montrent que le combustible serait majoritairement de type herbacé.

Pendant la période du deuxième incendie (770-790 cal. BP), on observe un rapport l/L supérieur à 0,5 traduisant la présence de végétaux ligneux, confirmé par la densité l/L supérieure à 0,5. Toutefois, le rapport PA/PNA égal à 20 semble indiquer la dominance des herbacées, résultat appuyé par le log stratigraphique établi par [D'Oliveira & Zitouni \(2021\)](#).

Pour le troisième incendie vers 670-700 cal. BP, le rapport l/L est légèrement supérieur à 0,5, ce qui traduit la présence de ligneux, tandis que la densité l/L proche de 0,5 appuie la présence à la fois de ligneux et d'herbacées.

Le rapport PA/PNA indique une dominance de combustibles herbacés avec un rapport proche de 20.

Pour le quatrième incendie (560-580 cal. BP), le rapport I/L supérieur à 0,5 semble indiquer la présence de végétaux ligneux. À l'inverse, la densité I/L (< 5) et le rapport PA/PNA (égal à 25) plaident pour un combustible majoritairement herbacé et une végétation dominée par des zones ouvertes.

Enfin, pour le cinquième incendie (380-430 cal. BP), le rapport I/L inférieur à 0,5, atteste de la présence majoritaire de combustibles herbacés. Ce résultat est appuyé par la densité I/L inférieure à 0,5 ainsi que par le rapport PA/PNA égal à 40.

DISCUSSION

1- Reconstitution des paléo-incendies

La méthode de comptage utilisée a permis de mettre en avant l'origine des charbons (locale ou régionale) et donc le lieu de l'incendie (Carcaillet et al., 2001). En effet, l'utilisation d'un tamis de 160 μm a permis aux particules de charbons, indicatrices d'un feu local (i.e. $> 100 \mu\text{m}$) ou micro régional de grande ampleur, d'être prises en compte (Clark et al., 1998 ; Carcaillet et al., 2001 ; Vannière, 2001). Les particules de charbons de grande taille ($> 100 \mu\text{m}$; Lynch 2004 ; Vannière et al., 2015) seraient faiblement transportées et donc resteraient proche de la source de l'incendie (Patterson, 1987 ; Lynch, 2004). À l'inverse, les petits charbons seraient transportés sur une plus grande distance (Patterson, 1987). Par ailleurs, une forte accumulation de charbon de bois serait un autre signal caractéristique d'un feu proche (100 m maximum) (Wein et al. 1987 ; Clark et al. 1998 ; Pitkänen et al. 1999). En partant du principe que tous les éléments observés lors des comptages étaient des charbons, cinq occurrences de feux ont été répertoriées (Fig. 3) durant le dernier millénaire, ce qui correspond à une forte fréquence de feu par rapport au reste de l'Holocène (Vannière et al., 2015 ; Cornet & Wales, 2020). Les dates de ces occurrences coïncident à celles du milieu de la période médiévale (950 cal. BP -

650 cal. BP), période durant laquelle la fréquence de feu double par rapport à la moyenne sur l'ensemble de l'Holocène (Vannière et al., 2015). D'après la littérature, cette période est marquée par la régression des surfaces boisées et corrélativement, par l'extension des zones dévolues à l'agriculture et à l'élevage (Tinner et al., 2005 ; Carrion et al., 2010). Les activités métallurgiques auraient également entraîné une déforestation et une production de produit carboné. Le besoin de combustible et la découverte de nouveaux filons semblent avoir fortement contribué à la déforestation du Mont Lozère (Baron et al., 2005). Au cours du Moyen Âge (950 cal. BP à 650 cal. BP), ces activités engendrent d'intenses défrichements. Toutes les espèces ligneuses sont en déclin telles que le hêtre et les chênes qui semblent disparaître au niveau des sites de fusion (Baron et al., 2005 ; Ploquin et al., 2010). Sur le Mont Lozère, l'agropastoralisme empêche tout reboisement suite à cette période, à l'instar de *Pinus sylvestris* replanté durant le XIX siècle (Baron et al., 2005) bien qu'il soit indigène de la région.

Les pratiques agropastorales et les activités métallurgiques nécessitent l'utilisation du feu par l'Homme, pour ouvrir les forêts et libérer de l'espace pour les cultures et pâtures (Vannière & Martineau, 2005 ; Miras et al., 2011 ; Nizou et al., 2019), ou bien pour le besoin de combustible et de matériaux (Baron et al., 2005 ; Ploquin et al., 2010), respectivement.

L'incendie le plus ancien identifié sur la période de 1015 à -65 cal. BP est daté vers 970-1000 cal. BP (Fig. 3), ce qui correspond au début de la deuxième plus importante phase d'activités métallurgiques observée sur le Mont Lozère durant le Moyen Âge (Baron et al., 2005). Cette déforestation par le feu aurait facilité l'accès à des filons de minerai argentifère (Ploquin et al., 2010). L'influx de charbon de cette période suggère que l'incendie aurait été plutôt long, mais d'intensité modérée (Fig. 3a). Selon Cornet & Wales (2020), ce fut l'un des derniers incendies pour lequel le combustible est de type ligneux. Or, d'après nos résultats, le

combustible utilisé lors de cet incendie était de type herbacé, résultat concordant avec le rapport PA/PNA (Cartier et al., 2021) et avec le log stratigraphique proposé par D'Oliveira & Zitouni (2021) qui semblent confirmer une dominance des herbacées. Le diagramme pollinique réalisé par Cartier et al. (2021) confirme également la présence importante de Poaceae, comparée aux autres taxons pendant cette période. Ces résultats coïncident également avec la courbe de densité I/L qui plaide en faveur d'un combustible en majorité herbacé. Toutefois, malgré la déforestation, certains taxons ligneux ont perduré comme *Quercus* et *Pinus* (de Beaulieu et al., 1974), ce qui peut expliquer les résultats obtenus par Cornet & Wales (2020), indiquant une utilisation de combustible ligneux. Il est également important d'ajouter que le modèle d'âge sur lequel se base nos résultats et ceux de Cornet & Wales (2020) sont très différents. Il est donc possible que les deux enregistrements respectifs des incendies de la tourbière des Nassettes et de la tourbière de Peschio soient en réalité beaucoup plus éloignés dans le temps. Malgré la cohérence de ces résultats pour cet incendie, il serait maladroit d'écarter le principe selon lequel toutes les particules répertoriées étaient des charbons. Il est possible que des résidus organiques ayant une apparence similaire, tels que des éclats de chitine d'insectes ou des restes de végétaux noircis, aient été confondus avec des charbons. Des erreurs dans la reconnaissance des charbons ont pu être commises du fait de notre faible expérience dans ce domaine.

D'autres événements de feu ont été répertoriés, avec des durées plus ou moins longues selon l'intensité des activités anthropiques. À 770-790 cal. BP, période où l'activité de fusion est à son maximum (Baron et al., 2005), l'incendie a été de courte durée, mais d'intensité probablement sévère, avec un influx de charbon proche de $2,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ (Fig. 3a). En raison de l'abondance de ressources minières (notamment de plomb argentifère) et de combustible de type ligneux sur place comme l'attestent nos résultats (rapport I/L > 5 ; Baron et al., 2005), près de 75 sites à scories associés à 200 charbonnières

ont été répertoriés sur le Mont Lozère (Ploquin et al., 2010). Il s'agit également d'une période de climat particulièrement chaud (de 1000 cal. BP à 700 cal. BP). Le combustible est alors sec et facilement inflammable. Ce paramètre est à prendre en compte car malgré l'intensité des activités anthropiques sur cette période. En effet, un incendie d'origine naturelle reste une piste probable (Dietz et al., 2018). Le rapport I/L et la densité I/L calculé montre une présence plus importante de ligneux, alors que le rapport PA/PNA tout comme le log stratigraphique (D'Oliveira & Zitouni, 2021) indiquent une prédominance herbacée. On peut émettre l'hypothèse qu'un incendie s'est déclaré sur un îlot forestier malgré un milieu ouvert dominé par des herbacées. Les particules de charbons ligneux ainsi produites ont pu rester autour de la source de l'incendie à cause de leur taille plus importante que les particules herbacées (Patterson, 1987).

Toutefois, les défauts de maîtrise du logiciel *Winseedle* peuvent également être une source de biais. Malgré une prise de mesure automatique, un ajustement manuel des mesures pouvait être nécessaire. Cet ajustement, réalisé sur 100 échantillons avec un nombre de charbons variables dans chacun d'eux, fournit un biais potentiel. L'erreur pouvant être générée lors de l'ajustement manuel pourrait fournir une potentielle réponse quant aux résultats des deux incendies de 670-700 cal. BP et 560-580 cal. BP dont le rapport I/L indique des charbons issus de ligneux (Fig. 3c), alors que d'après la littérature, les derniers grands ligneux présents sur le Mont Lozère ont disparu, et offre un paysage composé de Poaceae et de callunes (de Beaulieu et al., 1974). La période durant laquelle apparaissent ces incendies correspond à l'entrée dans le petit Âge glaciaire (PAG). L'impact des conditions climatiques du PAG sur les sociétés et l'économie de l'époque en Europe a été mis en avant par Camenisch & Rohr (2018), notamment la chute de production agricole, entraînant une augmentation du prix des denrées, un début de famine, des épidémies ou encore une forte baisse démographique en Europe. On peut émettre

l'hypothèse que ce qui était valable à l'échelle de l'Europe, pouvait l'être aussi à l'échelle locale du Mont Lozère. Il est donc possible que le combustible ligneux retrouvé dans les incendies de la fin du Moyen Âge au Mont Lozère, soit lié à une recolonisation forestière en raison de la régression des activités anthropiques. De plus, les données palynologiques sur lesquelles nous nous sommes appuyées pour discuter de nos résultats, n'excluent pas le fait d'une présence de restes de chaméphytes provenant de zones arborées, pouvant également expliquer la présence de combustible ligneux dans les résultats.

Par ailleurs, d'après les informations historiques à notre disposition, il semble qu'il n'y ait pas eu de reboisement après la cessation des activités métallurgiques sur le Mont Lozère, à cause de la pression de l'agropastoralisme perpétuant les pratiques utilisant le feu comme l'écobuage (Baron et al., 2005). Sur le Mont Lozère, l'agropastoralisme a semble-t-il empêché tout reboisement suite à cette période. Le pin sylvestre, *Pinus sylvestris*, n'est en effet replanté que durant le XIX siècle (Baron et al., 2005). Les pratiques d'écobuage ont donc continué à être utilisées régulièrement par l'Homme, pour éliminer les petits ligneux comme les genets et les bruyères (Saboulin Bollena, 1974 ; Baron et al., 2005). Le paysage a été totalement ouvert par l'utilisation du feu à des fins agropastorales (McWethy et al., 2013). L'occurrence de feu repérée vers 400 cal. BP abonde dans ce sens et est soutenue par le log stratigraphique obtenu par D'Oliveira et Zitouni (2021) ainsi que par les données polliniques (Cartier et al., 2021).

Enfin, l'altitude est un paramètre à prendre en considération car elle influence significativement les schémas régionaux des paléo-incendies (Vannière et al., 2015). En effet, les reliefs ont été exploités bien après que les plaines et les collines de basses altitudes aient été investies à des fins agricoles. Une plus grande quantité de biomasse était donc présente au sein de ces reliefs encore vierges d'activités humaines en

comparaison aux plaines et collines de basse altitude (Vannière et al., 2015). Pour étendre les surfaces agricoles, l'Homme a utilisé le feu jusqu'aux reliefs arborés, ce qui explique la fréquence des feux observés sur le Mont Lozère (Vannière et al., 2015).

2- Limite de la méthode

Le nombre insuffisant de dates pour la réalisation du modèle d'âge n'a pas permis d'avoir une courbe lissée correcte. C'est pour cette raison que l'on observe entre 0 et 50 cm de profondeur, une courbe à pente très prononcée (Fig. 2). De ce fait, il est possible que les données obtenues après la réalisation du taux d'accumulation sédimentaire (TAS) du Peschio (D'Oliveira & Zitouni, 2021) ne concordent pas avec les données du TAS de d'autres tourbières régionales comme celle des Nassettes par exemple (Cornet & Wales, 2020).

La présence de racines sur les premiers centimètres de la carottes #PES-2020-A1, a rendu le prélèvement des échantillons de 0,5 cm³ plus complexe. Qui plus est, la dissolution de la matière organique dans les piluliers n'était pas optimale malgré l'utilisation d'hydroxyde de potassium (KOH), de métaphosphate (NaPO₃) et d'hypochlorite de sodium (NaClO). L'ajout de chaux entraînant l'augmentation du pH des solutions, pourrait améliorer la dissolution de la matière organique et faciliter l'extraction des charbons.

La reconnaissance des charbons lors des comptages est également un biais à prendre en considération. Les analystes étant novices dans ce domaine, des particules de charbons ont pu être confondues avec d'autres résidus présents au début des comptages

Enfin, la crise sanitaire de la Covid-19 a raccourci la durée du temps d'analyse en laboratoire, réduisant la collecte des données. Un jeu de données remontant plus loin dans le temps aurait pu donner plus d'informations sur les incendies de l'Holocène.

3- Perspectives possibles

Au cours de cette étude, nous avons mis l'accent sur l'utilité du charbon en tant qu'indicateur permettant de répertorier et de caractériser les incendies. Cependant, de récentes études ont montré que le lévoglucosan pouvait aussi être un proxy important pour la reconstruction des paléo-feux (Bhattacharai et al., 2019). Le lévoglucosan provient de la pyrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose des végétaux. On le retrouve dans la fumée de charbon ainsi que dans le lignite (Bhattacharai et al., 2019 ; Rybicki et al., 2020). L'émission de lévoglucosan dans l'environnement dépend de la température de combustion ainsi que du type de biomasse (bois dur, bois de résineux, résidus de culture et pourcentage de cellulose) (Bhattacharai et al., 2019 ; Rybicki et al., 2020).

Son utilité en tant que traceur d'incendies a été discutée dans la littérature. En effet, selon certaines études, le lévoglucosan n'a pas une bonne stabilité chimique de par l'absence de composants inertes, à l'inverse du charbon (Bhattacharai et al., 2019). De ce fait, le lévoglucosan ne serait pas stable dans le temps et se dégraderait. Par la suite, d'autres auteurs tels que Rybicki et al. (2020) ont montré qu'en analysant l'isotope de carbone stable $\sigma^{13}\text{C}$ du lévoglucosan, il était possible d'évaluer la contribution relative de la combustion du charbon par rapport aux sources de combustions de la biomasse. L'étude du lévoglucosan, en parallèle de celle des particules de charbons sédimentaires, pourrait apporter des résultats complémentaires à notre étude.

CONCLUSION

Cette étude, fondée sur la quantification et la caractérisation des particules de charbons sédimentaires de la tourbière du Peschio, vient s'ajouter à celle déjà réalisée par Pulido Avila (2006), et compléter d'autres analyses sur les tourbières régionales (de Beaulieu & Gilot, 1972 ; de Beaulieu, 1974 ; Baron et al., 2005 ; Pulido Avila, 2006 ; Servera Vives, 2014 ; Cornet & Wales, 2020).

Notre étude a permis de mettre en avant cinq

occurrences de feu au cours du dernier millénaire dont l'origine principale serait anthropique, même si on ne peut exclure la survenue de feux d'origine naturelle. Le dernier millénaire BP a été marqué par une importante activité de fusion (métallurgie et plomb argentifère) entraînant la déforestation par le feu du massif du Mont Lozère. Cette déforestation a totalement modifié la structure et la composition des écosystèmes. Nos résultats montrent que les formations forestières et pré-forestières à *Fagus* et *Betula* ont été remplacées par des formations ouvertes dominées par des herbacées, étayant les données publiées, notamment sur la chronologie des événements.

L'étude des charbons sédimentaires est donc un précieux outil pour comprendre la dynamique des feux sur le long terme (Lynch et al., 2004). L'association avec d'autres proxies paléocologiques sur le long-terme devrait fournir davantage de données sur les paléoincendies et sur l'histoire des paléoenvironnements du Mont Lozère.

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. J., Yongo O., Bremond L. & Favier C. (2013). Tracking land-cover changes with sedimentary charcoal in the Afrotropics. *The Holocene*, 23 (12) : 1853-1862.
- Allée P., Paradis S., Boumédiène F. & Rouaud R. (2010). L'exploitation médiévale du plomb argentifère sur le mont Lozère. *ArchéoSciences*, 34 : 177-186.
- Bal M.-C., Allée P. & Liard M. (2015). The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses: Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. *Quaternary International*, 366 : 3-14.
- Barbeta A., Camarero J.J., Sanguesa-Barreda G., Muffler L. & Penuelas J. (2019). Contrasting effects of fog frequency on the radial growth of two tree species in a Mediterranean-temperate ecotone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264 :

- 297-308.
- Baron S., Lavoie M., Ploquin A., Carignan J., Pulido M. & de Beaulieu J.L. (2005). Record of Metal Workshops in Peat Deposits: History and Environmental Impact on the Mont Lozère Massif, France. *Environmental Science & Technology*, 39 (14) : 5131-5140.
- de Beaulieu J.-L. (1974). Évolution de la végétation sur la bordure montagnaise cévenole au postglaciaire, d'après les pollens. *Bulletin de la Société Languedocienne de géographie*, 8 : 3-4.
- Bhattarai H., Saikawa E., Wan X., Zhu H., Ram K., Gao S., Kang S., Zhang Q., Zhang Y., Wu G., Wang X., Kawamura K., Fu P. & Cong Z. (2019). Levoglucosan as a tracer of biomass burning: Recent progress and perspectives. *Atmospheric Research*, 220 : 20-33.
- Blaauw M. (2010). Methods and code for "classical" age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5 : 512-518.
- Camenisch C.H., Rohr C.H. (2018). When the weather turned bad. The research of climate impacts on society and economy during the little ice age in Europe. An overview. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44 (1) : 99-114.
- Carcaillet C., Bouvier M., Fréchette B., Larouche A.C. & Richard P.J.H. (2001). Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene*, 11 (4) : 467-476.
- Carrión Y., Kaal J., López-Sáez J.A., López-Merino L. & Martínez Cortizas A. (2009). Holocene vegetation changes in NW Iberia revealed by anthracological and palynological records from a colluvial soil. *The Holocene*, 20 (1) : 53-66.
- Cartier A., Creusot P. & Delandhuy A. (2021). Étude palynologique de la dynamique végétale holocène de la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 37-55.
- Clark J.S. (1988). Particle Motion and the Theory of Charcoal Analysis: Source Area, Transport, Deposition, and Sampling. *Quaternary Research*, 30 (1) : 67-80.
- Clark J.S., Royall P.D. (1996). Local and Regional Sediment Charcoal Evidence for Fire Regimes in Presettlement North-Eastern North America. *The Journal of Ecology*, 84 (3) : 365.
- Clark J.S., Lynch J., Stocks B.J. & Goldammer J.G. (1998). Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, 8 (1) : 19-29.
- Colombaroli D., Vannièrè B., Emmanuel C., Magny M. & Tinner W. (2008). Fire vegetation interactions during the Mesolithic Neolithic transition at Lago dell'Accesa, Tuscany, Italy. *The Holocene*, 18 (5) : 679-692.
- Cornet F. & Wales A. (2020). Reconstitution des paléo-incendies du Mont Lozère (Cévennes, France) du Tardiglaciaire à nos jours. *Orpalm Synthesis*, 13 (1) : 9-24.
- Cosandey C. & Didon-Lescot J.F. (1990). Étude des crues cévenoles : conditions d'apparition dans un petit bassin forestier sur le versant sud du Mont Lozère, France. *Regionalization in Hydrology*, 191 : 103-115.
- Dietz E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., Dörfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminiene L., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremaska M., Pedziszewska A., Poska A., Rehfeld K., Stancikaite M., Stivrins N., Święta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vannièrè B. & Stowinski M. (2018). Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. *Quaternary Science Reviews*, 201 : 44-56.
- D'Oliveira L. & Zitouni A. (2021). Dynamique d'accumulation de tourbe dans le sud du Massif Central : focus sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 21-36.
- Feurdean A., Liakka J., Vannièrè B., Marinova E., Hutchinson S.M., Mosbrugger V. & Hickler T. (2013). 12,000-Years of fire

- regime drivers in the lowlands of Transylvania (Central-Eastern Europe): a data-model approach. *Quaternary Science Reviews*, 81 : 48-61.
- Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., San-Miguel-Ayanz J., Long-Fournel M. & Lampin C. (2013). A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. *Environmental Management*, 51 (3) : 651-662.
- Hennebelle A., Aleman J.C., Ali A.A., Bergeron Y., Carcaillet C., Grondin P., Landry J. & Blarquez O. (2020). The reconstruction of burned area and fire severity using charcoal from boreal lake sediments. *The Holocene*, 30 (10) : 1400-1409.
- Higuera P., Peters M., Brubaker L. & Gavin D. (2007). Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews*, 26 (13-14) : 1790-1809.
- Huysecom E. (2006). Vers un "Néolithique africain" : concept et apparition. *Etudes maliennes*, 65 : 43-67.
- Jowsey P.C. (1966). An improved peat sampler. *New Phytologist*, 65 (2) : 245-248.
- Lynch J.A., Clark J.S. & Stocks B.J. (2004). Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 34 (8) : 1642-1656.
- Magny M., de Beaulieu J.-L., Drescher-Schneider R., Vannière B., Walter-Simonnet A.-V., Miras Y., Millet L., Bossuet G., Peyron O., Brugiapaglia E. & Leroux A. (2007). Holocene climate changes in the central Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lake Accesa (Tuscany, Italy). *Quaternary Science Reviews*, 26 (13-14): 1736-1758.
- Magny M., Combourieu-Nebout N., de Beaulieu J.L., Bout-Roumazeilles V., Colombaroli D., Desprat S., Francke A., Joannin S., Ortu E., Peyron O., Revel M., Sadori L., Siani G., Sicre M.A., Samartin S., Simonneau A., Tinner W., Vannière B., Wagner B., Zanchetta G., Anselmetti F., Brugiapaglia E., Chapron E., Debret M., Desmet M., Didier J., Essallami L., Galop D., Gilli A., Haas J.N., Kallel N., Millet L., Stock A., Turon J.L. & Wirth S. (2013). North–south palaeohydrological contrasts in the central Mediterranean during the Holocene: tentative synthesis and working hypotheses. *Climate of the Past*, 9 (5) : 2043-2071.
- Manen C., Sabatier P. (2003). Chronique radiocarbone de la n olithisation en Méditerranée nord-occidentale. *Bulletin de la Société Pr historique Française*, 100 (3) : 479-504.
- Mayewski P.A., Rohling E.E, Stager J.C., Karl n W., Maasch K.A., Meeker L.D., Meyerson E.A., Gasse F., Van Kereveld S., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R. & Steig E.J. (2004). Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62 (3) : 243-255.
- McWethy D.B., Higuera P.E., Whitlock C., Veblen T.T., Bowman D.M.J.S., Cary G.J., Haberle S.G., Keane R.E., Maxwell B.D., McGlone M.S., Perry G.L.W., Wilmshurst J.M., Holz A. & Tepley A.J. (2013). A conceptual framework for predicting temperate ecosystem sensitivity to human impacts on fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*, 22 (8) : 900-912.
- Miras Y., Guenet P. & Richard H. (2011). Holocene vegetation, landscape, and reconstruction of human activity from prehistory to the roman period based on new pollen data performed in “the plateau de Millevaches” (Limousin, Massif Central, France). *Quaternaire*, 22 (2) : 147-164.
- Muller S.D. (2002). Influence de la végétation sur l’accumulation de la tourbe au Québec méridional. *Comptes Rendus Biologies*, 325 (5) : 629-40.
- Nizou J., Dennielou B., R villon S., Bassetti M.-A., Jouet G., Bern  S., Nonnotte P. & Liorzou C. (2019). Records of Holocene climatic fluctuations and anthropogenic lead input in elemental distribution and radiogenic isotopes (Nd and Pb) in sediments of the Gulf of Lions (Southern France). *The Holocene*, 29 (8) : 1292-1304.

- Patterson W.A., Edwards K.J. & Maguire D.J. (1987). Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, 6 (1) : 3-23.
- Pigeaud R. (2009). Rencontre avec Jean Guilaine. Le néolithique quoi de neuf ? *Sciences Humaines*, 202 : 24-24.
- Pitkänen A., Lehtonen H. & Huttunen P. (1999). Comparison of sedimentary microscopic charcoal particle records in a small lake with dendrochronological data: evidence for the local origin of microscopic charcoal produced by forest fires of low intensity in eastern Finland. *The Holocene*, 9 (5) : 559-567.
- Ploquin A., Allée P., Bailly-Maître M.-C., Baron S., de Beaulieu J.-L., Carignan J., Laurent S., Lavoie M., Le Carlier C.M., Paradis S., Peytavin J. & Pulido M. (2010). PCR Le Plomb argentifère ancien du Mont Lozère (Lozère). *ArchéoSciences*, 34 : 99-114.
- Pulido Avila M.G. (2006). *Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique post-glaciaire de la végétation dans le sud du Massif Central, France*. Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne, Aix-Marseille, 308 p.
- Rackham O., Vernet J.-L., & Chabal L. (1999). L'homme et la forêt méditerranéenne : De la préhistoire à nos jours. *American Journal of Archaeology*, 103(1) : 129
- Reille M. (1988). Analyse pollinique de la tourbière des Nassettes, Mont Lozère (France). Réponse à quelques questions biogéographiques. *Revue du Gévaudan*, 2 : 3-7.
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62 : 33 p., doi: 10.1017.
- Renssen H., Seppä H., Heiri O., Roche D.M., Goosse H. & Fichet T. (2009). The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. *Nature Geoscience*, 2(6) : 411-414.
- Rius D. (2012). Holocene fire regime changes from local to regional scale documented by multiple-site sedimentary charcoal analyses in the Lourdes basin (Pyrenees, France). *Quaternary International*, 279-280 : 405.
- Robin V., Knapp H., Rickert B.-H., Talon B. & Nelle O. (2013). Comparaison de signaux anthracologiques Holocènes issus de différents types d'archives en Allemagne : vers une reconstitution plus précise de l'histoire des incendies ? *Quaternaire*, 24 (2) : 167-177.
- Rybicki M., Marynowski L., Bechtel A. & Simoneit B.R.T. (2020). Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values of levoglucosan from low-temperature burning of lignite and biomass. *Science of The Total Environment*, 733 : 138991.
- de Saboulin Bollena R. (1974). Les écobuages en Lozère. *Revue forestière française*, 26(sup) : 117-121.
- Servera Vives G., Miras Y., Riera S., Julià R., Allée P., Orengo H., Paradis-Grenouillet S. & Palet J.M. (2014). Tracing the land use history and vegetation dynamics in the Mont Lozère (Massif Central, France) during the last 2000 years: The interdisciplinary study case of Countrasts peat bog. *Quaternary International*, 353 : 123-139.
- Stuiver M. & Reimer P.J. (1993). Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35: 215-230.
- Tinner W., Conedera M., Ammann B. & Lotter A.F. (2005). Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *The Holocene*, 15 (8) : 214-226.
- Vannièr B., Martineau R. (2005). Histoire des feux et pratiques agraires du Néolithique

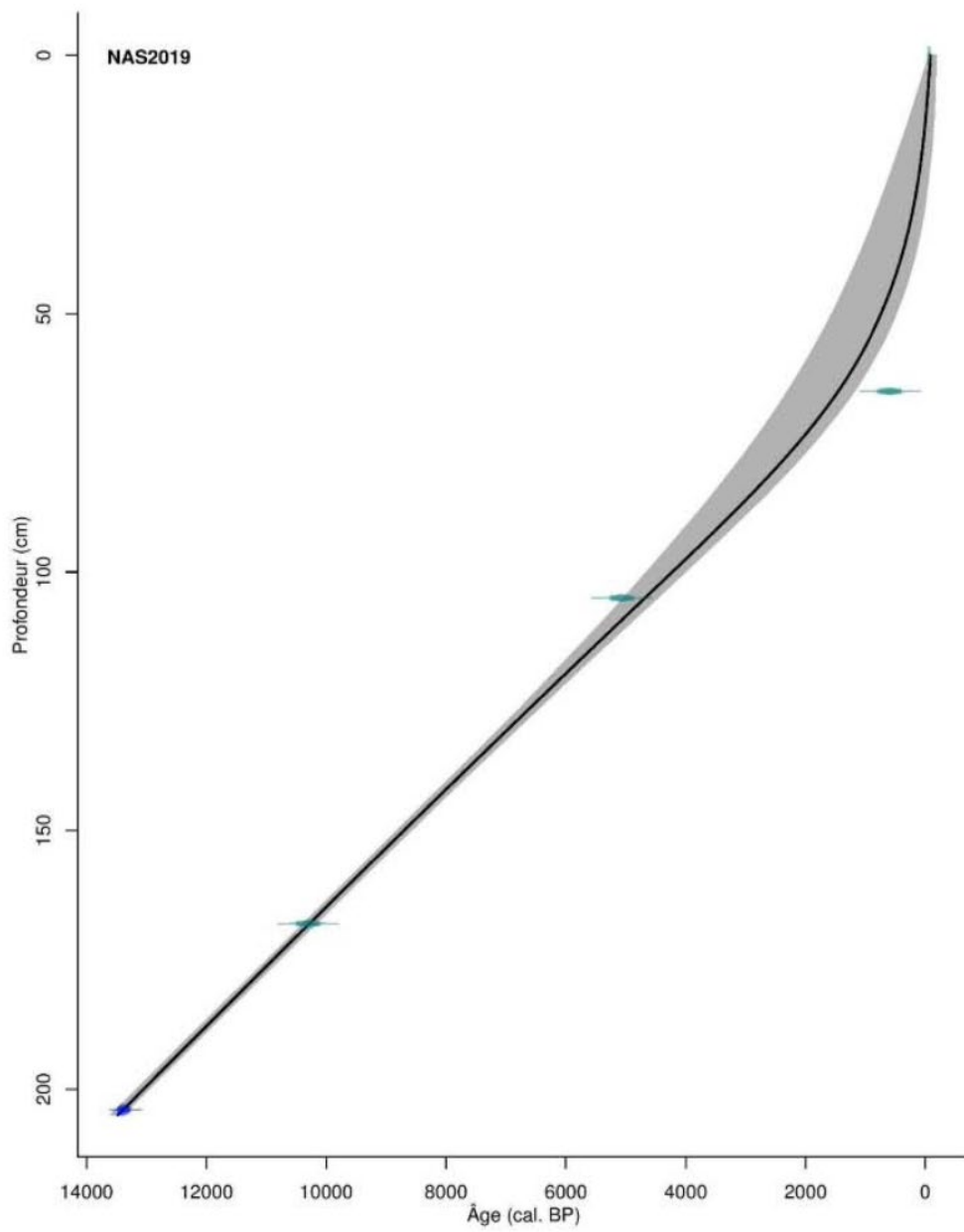
à l'âge du Fer en région Centre : implications territoriales, démographiques et environnementales. *Gallia préhistoire*, 47(1) : 67-186.

Vannière B., Blarquez O., Rius D., Doyen E., Brücher T., Colombaroli D., Connor S., Feurdean A., Hickler T., Kaltenrieder P., Lemmen C., Leys B., Massa C. & Olofsson

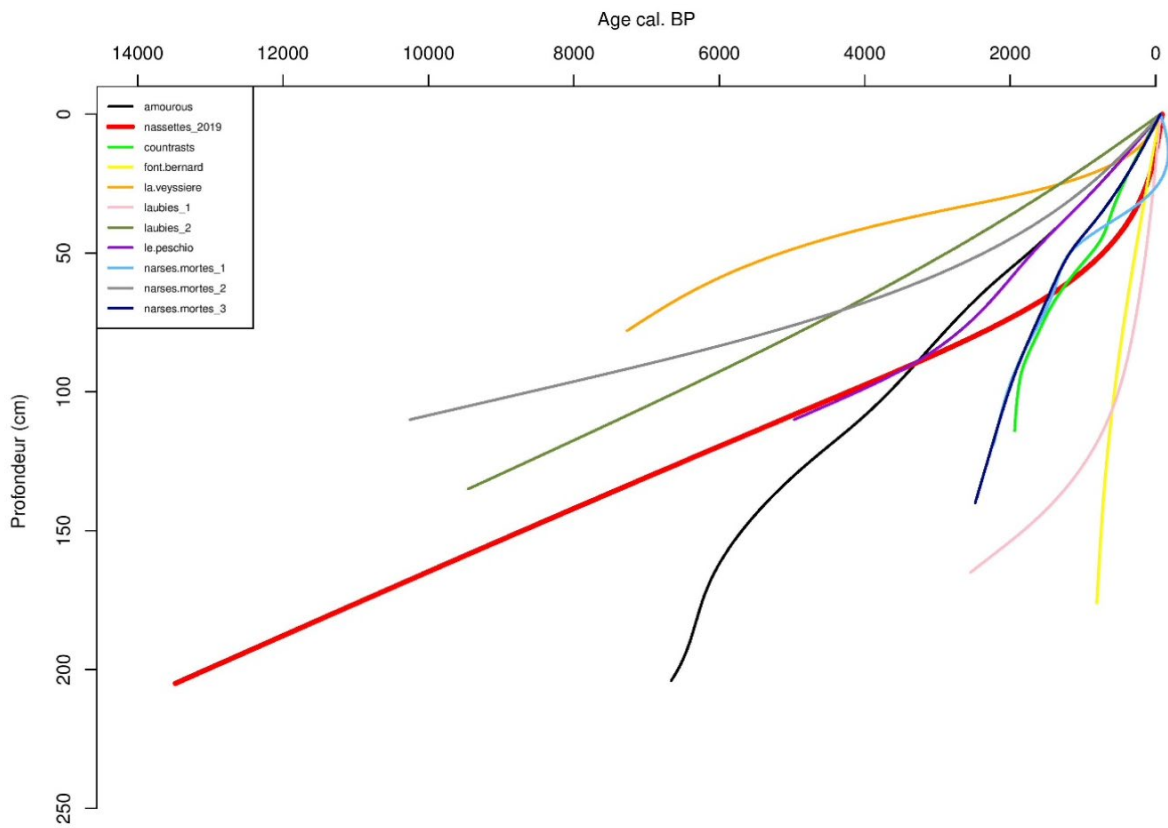
J. (2015). 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes. *Quaternary Science Reviews*, 132 : 206-212.

Wein R.W., Burzynski M.P., Sreenivasa B.A. & Tolonen K. (1987). Bog profile evidence of fire and vegetation dynamics since 3000 years BP in the Acadian Forest. *Canadian Journal of Botany*, 65(6) : 1180-1186.

ANNEXE 1. Modèle âge-profondeur de la tourbière des Nassettes (d'après [Cornet & Wales, 2020](#)).



ANNEXE 2. Modèles d'âge proposés dans la littérature concernant les tourbières de la région du Mont Lozère (extrait de [Cornet & Wales, 2020](#), d'après [de Beaulieu & Gilot, 1972](#) ; [de Beaulieu, 1974](#) ; [Baron et al., 2005](#) ; [Pulido Avila, 2006](#) ; [Servera Vives, 2014](#)). La tourbière du Peschio est en violet.



RHIZOPODES DU SUD DE LA FRANCE ET ETUDE EXPLORATOIRE DE LA TOURBIERE DU PESCHIO (MONT LOZERE)

Julian Gentile ¹, Théo Maisonhaute ² et Adrien Wales ³

Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (UMR 5554)

Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France

¹ julian.gentile@etu.umontpellier.fr, ² theo.maisonhaute@etu.umontpellier.fr,

³ adrien.wales@etu.umontpellier.fr

Encadrement : Vincent Girard

Citation : Gentile J., Maisonhaute T. & Wales A. (2021). Rhizopodes du sud de la France et étude exploratoire de la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 73-92.

Résumé : L'analyse des thèques des thécamoebiens fournit des informations pour la reconstruction paléoenvironnementale et peut révéler des changements du milieu. L'analyse des séquences sédimentaires issues de la tourbière du Peschio et d'autres sites dans la région a permis de dresser un inventaire des thécamoebiens présents dans le Sud de la France. Dans la tourbière du Peschio, il y a environ 450 ans cal BP, des activités anthropiques ont altéré la conservation des thèques des thécamoebiens. Les assemblages de rhizopodes apparaissent hétérogènes entre les différents sites. Les rhizopodes sont de bons bioindicateurs mais les sites d'étude nécessitent d'autres analyses complémentaires.

Mots clés : sphaignes, communautés, thécamoebiens, hétérogénéité, bioindicateurs, pH

Abstract: *Rhizopods from Southern France and exploratory study of the Peschio fen (Mont Lozère).* Analysis of thecamoebians provides information for paleoenvironmental reconstruction and may reveal environmental changes. The analysis of the sedimentary sequences carried out in the Peschio fen and in other sites in the region made it possible to draw up an inventory of thecamoebians present in the South of France. In the Peschio fen, around 450 cal BP years ago, anthropogenic activities altered the conservation of thecamoebians testate. The rhizopod assemblages appear heterogeneous between the different sites. Rhizopods are good bioindicators, but study sites require further analysis.

Keywords: peat moss, thecamoebians, communities, heterogeneity, bioindicators, pH

Les tourbières sont des écosystèmes humides caractérisés par une forte teneur en matière organique, liée à un faible taux de décomposition. Grâce à cela, elles jouent le rôle d'archive des différents organismes et du climat passé. Elles permettent de reconstituer les paléoenviron-

nements, les paléo-incendies et les paléo-végétations à travers différentes méthodes comme la palynologie, anthracologie ou la sédimentologie. Les tourbières recouvrent environ 3% de la surface terrestre (Cris, 2014). Elles sont intéressantes d'un point de vue écologique dans le contexte du

réchauffement climatique, car elles stockent actuellement un quart du carbone emprisonné dans les sols, soit 550 gigatonnes de carbone (Cris, 2014). Ces zones humides sont menacées par l'exploitation humaine (drainage pour l'agriculture, usage de la ressource en eau douce, utilisation de la tourbe), qui met en péril la biodiversité dépendante de ce milieu (Littlewood, 2010). Étudier la biodiversité présente dans les tourbières ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques permet d'établir des mesures à prendre pour leur conservation.

La tourbe conserve un nombre important de bioindicateurs, micro et macrofossiles. Notre travail s'intéresse à un groupe d'amibozoaires classé dans les palynomorphes non polliniques, les rhizopodes ou thécamoebiens. Ce sont des organismes unicellulaires vivant en milieu relativement humide produisant leur propre sont sensibles aux conditions de leur environnement (Booth, 2001). Bonnet (1976) a proposé une classification de ce groupe, qu'il a subdivisé en deux ensembles : (1) les rhizopodes à pseudopodes *filoses*, considérés comme "stratèges" r, avec de petites thèques et une durée de génération courte, et (2) les rhizopodes à pseudopodes *loboses*, stratèges K, avec de grandes thèques et une durée de génération plus longue. Bonnet (1976) a défini sur cette base un indice L/F qui est la proportion de rhizopodes *loboses* par rapport aux *filoses*. Cet indice a été utilisé pour des études écologiques et paléoécologiques afin d'estimer la capacité de rétablissement des écosystèmes après perturbation. Les rhizopodes sont de bons bioindicateurs des propriétés de leur habitat, surtout de la profondeur de la nappe phréatique d'eau, du pH et de la granulométrie (Mitchell et al., 1999 ; Lamentowicz, 2005).

1- Les rhizopodes : généralités

Milieu de vie

L'étude des rhizopodes ou thécamoebiens est récente, puisqu'elle a commencé à la fin du XIX^e siècle et s'est accentuée au début du XX^e siècle. On estime le nombre de taxons décrits aujourd'hui à environ 2000, ce qui est sans doute sous-estimé au vu du manque

d'études dédiées (Smith et al., 2008). On retrouve ces microorganismes dans de nombreux milieux : près des 2/3 vivent dans les eaux douces, 1/5^e dans les tapis bryophytiques, 1/10^e dans le sol et seulement 1/100^e dans le milieu marin (Delaine, 2016). Les rhizopodes ont un développement optimum pour les milieux acides (Stout, 1968). Sur l'ensemble des amibes à thèques connues, 3/4 appartiennent à l'ordre des *Arcellinida*, appartenant à la catégorie *loboses* (Lara et al., 2008).

Constitution des thèques

Les rhizopodes sont composés de deux parties : une partie organique et une partie soit minérale soit protéique (thèque ou thèque). Dans le cadre des études paléoécologiques, on les identifie essentiellement à l'aide de cette dernière. La thèque est constituée soit d'éléments autogènes, xénogènes ou d'un mélange des deux (Delaine, 2016). En étudiant en détail la composition des thèques, les chercheurs ont pu en déterminer 4 types : protéique, siliceuse, agglutinée et calcique (Ogden & Hedley, 1980). Les thèques protéiques et siliceuses sont d'origine endogène, à partir de substances sécrétées par les thécamoebiens, respectivement des protéines et des d'idiosomes (écailles) siliceux (Delaine et al., 2014). Les thèques agglutinées, sont au contraire d'origine exogènes et dépendent fortement de leur environnement. Les thèques calciques, moins répandues sont recouvertes d'une couche de phosphate de calcium ou d'idiosome de carbonate sous la forme d'écailles carrées (Golemansky, 2008).

Régime alimentaire

Sur le plan alimentaire, les thécamoebiens sont généralement hétérotrophes mais certains sont mixotrophes (Gomaa et al., 2014). Ils se nourrissent de bactéries, de spores et d'hyphes de champignons, d'autres protozoaires et de métazoaires (Couteaux & Pussart, 1983). Des cas de cannibalisme ont même été recensés (Gilbert et al., 2000). En tant que superprédateurs de la chaîne microbienne, ils ont un rôle clé dans l'écosystème en régulant la prolifération des microorganismes qu'ils

consomment, et jouent aussi le rôle de recycleur de la matière organique (Aoki et al., 2007 ; Delaine et al., 2014).

2- Les rhizopodes : des bioindicateurs

Un bioindicateur est un taxon apportant des informations sur les caractéristiques écologiques d'un milieu, en raison d'une sensibilité particulière à ses modifications. Les thécamoebiens sont utilisés en paléoécologie comme bioindicateur pour déterminer l'évolution du niveau de la nappe phréatique, l'humidité de surface au fil du temps, l'acidité (pH), la granulométrie ou la conductivité. Ce sont des facteurs

environnementaux majeurs dans les tourbières (Mitchell et al., 1999 ; Booth, 2001 ; Lamentowicz, 2005 ; Hájek et al., 2006 ; Mitchell et al., 2013 ; Swindles et al., 2016). Toute variation de ces différents facteurs affecte directement et rapidement les communautés de rhizopodes (Fig. 1), du fait du faible temps de génération de ces derniers dans des conditions normales (Booth et al., 2008). Les activités anthropiques comme l'agriculture (Foissner, 1997), la déforestation et les incendies peuvent modifier la structure des communautés de rhizopodes en agissant sur le niveau des nappes phréatiques ou l'acidité du sol (Kajukało et al., 2016).

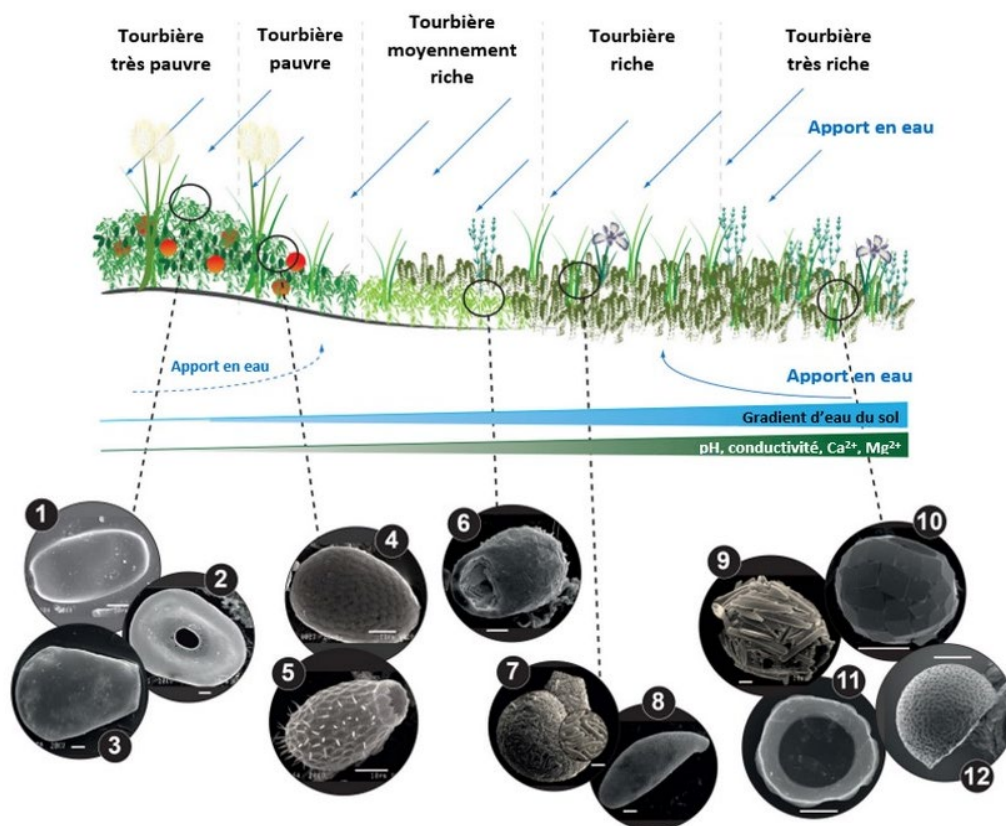


Figure 1. Exemple de rhizopodes dans les tourbières en fonction du gradient de la richesse de la tourbière (d'après Marcisz et al., 2020). (1) *Archerella flavum*, (2) *Arcella catinus*, (3) *Hyalosphenia papilio*, (4) *Assulina muscorum*, (5) *Euglypha strigosa*, (6) *Centropyxis aerophila*, (7) *Lesquereusia spiralis*, (8) *Cyphoderia cf. ampulla*, (9) *Diffflugia bacillariarum*, (10) *Paraquadrula irregularis*, (11) *Microchlamys patella*, (12) *Pyxidicula patens*. L'échelle des photos représente 10 μ .

Lorsque les rhizopodes meurent, leur test se conserve et peut être étudié. L'étude des tests permet de définir les différents taxons, et ainsi d'identifier un assemblage de rhizopodes. Ces assemblages permettent, à leur tour, de reconstruire les changements environnementaux qui ont eu lieu dans le passé, sur de longues échelles de temps (Roberts, 2013).

3- Biogéographie des rhizopodes

Les assemblages de thécamoebiens ont été étudiés sur l'ensemble de la planète comme par exemple au Canada (Warner et al., 2007), en République démocratique du Congo (Van Oye, 1958) ou encore dans le Sud de la France, surtout dans le Massif Central (Schmitt et al., 2010 ; Minana et al., 2012 ; Enjalbert et al., 2016 ; Docquier & Terreaux de Félice, 2017 ; Bertin & Durieux, 2018). D'après Bonnet (1994), certains taxons du Sud de la France n'ont pas été signalés ailleurs en Europe mais sont fréquents dans les régions inter tropicales à tropicales, en Amérique du Nord, Amérique centrale, en Corée, au Japon ou encore en Papouasie-Nouvelle Guinée. La présence de ces taxons pourrait être expliquée par l'histoire biogéographique, avec à l'origine un seul continent la Pangée qui s'est disloqué pour former les continents que l'on connaît aujourd'hui.

4- Problématique et objectifs

Dans cette étude, nous allons essayer de répondre à la question suivante :

Y a-t-il des communautés de rhizopodes spécifiques du Sud de la France et comment se répartissent-elles ?

Notre travail comporte donc plusieurs objectifs :

- Déterminer la diversité des thécamoebiens dans la tourbière du Peschio (Mont-Lozère)
- Dresser un inventaire des rhizopodes dont la présence a été recensée dans le Sud de la France.
- Comparer la diversité des thécamoebiens de plusieurs sites du Sud de la France

MATERIEL ET METHODES

1- Sites d'études

Notre étude porte sur la tourbière du Peschio. Cette tourbière est l'une des nombreuses que compte le mont Lozère. Elle se situe dans le sud-est du Massif Central. Elle est proche d'un cours d'eau qui porte son nom (Fig. 2). C'est une tourbière minerotrophe dont la végétation est majoritairement composée de sphaignes (*Sphagnum* spp.) et de plantes héliophytes, comme *Carex* spp. ou *Eriophorum vaginatum*.

2- Prélèvements sur le terrain

Des carottages (N44.464774° E3.634056° ; Fig. 2) ont été réalisés à l'aide d'un carottier russe. Nous avons prélevé jusqu'à 3 m de profondeur. Au total, 4 carottes ont été extraites : PES 2020 A1 (0-100 cm), A2 (180-280 cm), B1 (90-190 cm), B2 (200-300 cm). Les carottes A et B ont été prélevées à 20 cm de distance. Entre chaque carottage, le carottier russe a été nettoyé. Les carottes extraites ont été emballées et conservées jusqu'à leur utilisation en laboratoire.

3- Extraction et analyses en laboratoire

1 cm³ de sédiment a été prélevé sur chaque carotte aux profondeurs suivantes : 4-5 cm, 42-43 cm, 84-85 cm, 126-127 cm, 168-169 cm, 210-211 cm, 252-253 cm et 298-299 cm. Chaque prélèvement a été porté à ébullition dans 40 ml d'eau distillée pendant environ une dizaine de minutes. Chaque prélèvement a été ensuite tamisé à 250 µm afin de retirer les plus grosses particules, puis à 10 µm pour retirer les plus fines. Seules les particules entre ces 2 bornes ont été gardées. Les résidus de tamisage ont par la suite été centrifugés pendant 5 min à 3000 tours par minute. Une fois la centrifugation terminée, le surnageant a été éliminé, et deux gouttes de safranine ont été ajoutées afin de colorer les divers échantillons. Les échantillons ont ensuite été rincés à l'alcool, puis centrifugés. Les échantillons ont été placés dans des piluliers de 3 ml.

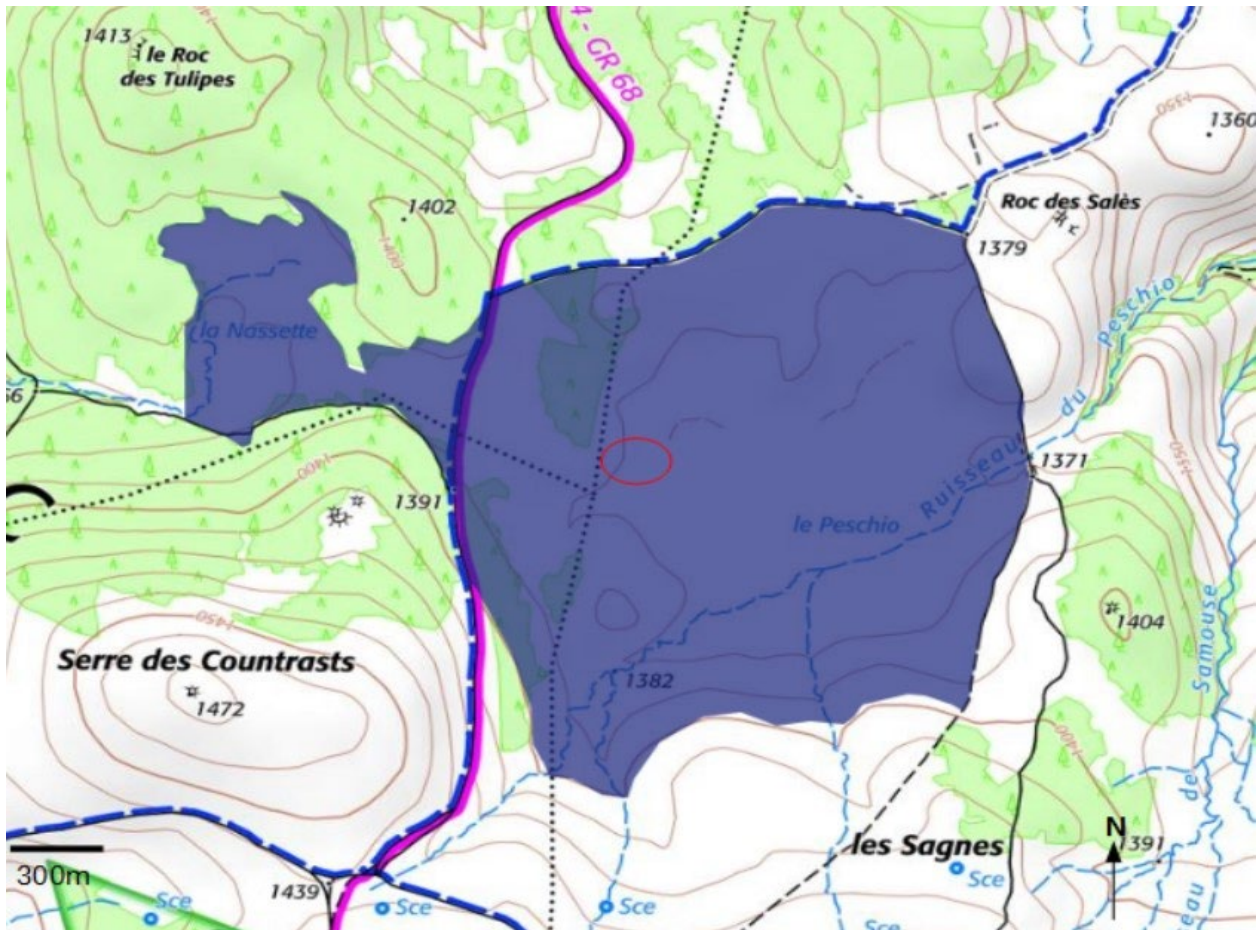


Figure 2. Tourbière du Peschio et des Nassettes (en bleu) et zone d'échantillonnage (cercle rouge)

Les piluliers ont été centrifugés pour séparer les rhizopodes, laisser s'évaporer l'alcool et ajouter quelques gouttes de glycérine. Les échantillons ont été dilués à la glycérine jusqu'à l'obtention d'une solution assez claire lorsqu'observée à travers une micropipette de 25 μ l. Nous avons déposé ces 25 μ l sur une lame, recouverte d'une lamelle de 22 mm de côté, puis scellée à l'aide d'histolaque.

Afin de répondre à l'objectif de notre étude, nous avons calculé la concentration en rhizopode de chaque niveau (Annexe 1).

Les indices de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou ont été calculés. L'indice de Shannon permet de déterminer si les individus observés dans un même site appartiennent à la même espèce ou non. Plus l'indice de Shannon est faible, plus l'habitat est dominé par une seule espèce. L'indice de Pielou indique l'abondance des espèces (Annexe 2).

Les indices de Jaccard et Sorensen ont aussi été calculés. Ces indices sont complémentaires et mesurent la similitude des assemblages d'espèces entre deux habitats. Ces indices varient entre 0 et 1. Plus l'indice de Jaccard est élevé, plus la biodiversité inter habitat est faible, due à des conditions environnementales similaires. Au contraire, plus il est faible, plus les espèces des deux habitats sont différentes et plus les conditions environnementales entraînent un turn-over important (De Bello et al., 2007 ; Annexe 3).

Pour l'indice de Sorensen, à 0, il n'y a aucune espèce commune aux deux habitats étudiés. À 1, toutes les espèces sont communes aux deux habitats (Annexe 4). 1 cm^3 de sédiment a été prélevé sur chaque carotte aux profondeurs suivantes : 4-5, 42-43, 84-85, 126-127, 168-169, 210-211, 252-253 et 298-299 cm. Chaque prélèvement a été porté à ébullition dans 40 ml d'eau distillée pendant environ

une dizaine de minutes. Chaque prélèvement a été ensuite tamisé à 250 µm afin de retirer les plus grosses particules, puis à 10 µm pour retirer les plus fines. Seules les particules entre ces 2 bornes ont été gardées. Les résidus de tamisage ont par la suite été centrifugés pendant 5 min à 3000 tours/min. Une fois la centrifugation terminée, le surnageant a été éliminé, et deux gouttes de safranine ont été ajoutées afin de colorer les divers échantillons. Les échantillons ont ensuite été rincés à l'alcool, puis centrifugés. Les échantillons ont été placés dans des piluliers de 3 ml. Ces piluliers ont été centrifugés pour séparer les rhizopodes, avant de laisser s'évaporer l'alcool et d'ajouter quelques gouttes de glycérine.

Les échantillons ont été dilués à la glycérine jusqu'à l'obtention d'une solution assez claire lorsque observée à travers une micropipette de 25 µl. Nous avons déposé ces 25 µl sur une lame, recouverte d'une lamelle de 22 mm de côté, puis scellée à l'aide d'histolaque.

Nous avons calculé la concentration en rhizopode de chaque niveau pour voir si celle-ci suivant l'âge diffère ou non (Annexe 1).

L'indice de Shannon permet de déterminer si dans un site si la diversité est homogène (les espèces ont sensiblement le même nombre d'individus) ou si au contraire elle est hétérogène (la majorité des individus appartiennent à une espèce). Plus l'indice de Shannon est faible, plus l'habitat est dominé par une seule espèce (Annexe 2).

Les indices de Jaccard et Sorensen sont complémentaires et mesurent la similitude des assemblages d'espèces entre deux habitats. Ces indices varient entre 0 et 1. Plus l'indice de Jaccard est élevé, plus la biodiversité inter-habitat est faible (conditions environnementales similaires). Au contraire, plus il est faible, plus les espèces des deux habitats sont différentes, et plus les conditions environnementales entraînent un turn-over important (De Bello et al., 2007 ; Annexe 3). Lorsque l'indice de Sorensen est égal à 0, il n'y a aucune espèce commune aux deux habitats

étudiés ; lorsqu'il est égal à 1, toutes les espèces sont communes aux deux habitats (Annexe 4).

A l'aide du package Clam sur R, la courbe du niveau de profondeur en à l'âge fonction de l'âge a pu être tracée (Annexe 5).

RESULTATS

Nous n'avons pu analyser que les 2 niveaux supérieurs (4-5 et 42-43 cm), qui correspondent respectivement à l'actuel et à environ 440 cal. BP. A 4-5 cm, la concentration est de 1251 rhizopodes/cm³ et nous avons trouvé 21 espèces (Fig. 3) : *Alabasta militaris*, *Arcella artocrea*, *A. discoides*, *A. gibbosa*, *A. rotunda*, *A. vulgaris*, *Centropyxis aculeata*, *C. aerophila*, *C. cassis*, *C. constricta*, *C. elongata*, *C. gibba*, *C. platystoma*, *Cyclopyxis arcelloides*, *C. eurystoma*, *C. kalhi*, *Gibbocarina galeata*, *Hyalosphenia papilio*, *Nebela collaris*, *N. parvula*, *N. vitrea*. L'indice de diversité de Shannon est égal à 2,75. L'échantillon situé à 42-43 cm de profondeur s'est révélé stérile en rhizopodes.

En associant notre liste d'espèce avec celles obtenues dans les précédentes études ORPALM (Minana et al., 2012 ; Enjalbert et al., 2016 ; Docquier & Terreaux de Félice, 2017 ; Bertin & Durieux, 2018), nous avons dressé l'inventaire des espèces et des lieux où elles ont été trouvées ainsi que leur abondance, lorsque cela était possible (Table 1). Au total, 16 familles, 23 genres et 76 espèces ont été recensés.

Les indices de diversité de Sorensen calculés avec les rhizopodes trouvés en surface sont compris entre 0,00 et 0,45. Les minimum et maximum sont entre les mêmes tourbières que pour le calcul de l'indice de Jaccard (Annexe 6). Les indices de Jaccard calculés avec les rhizopodes trouvés en surface sont compris entre 0,00 et 0,29. Le minimum est obtenu en comparant la tourbière de la Lande et la tourbière du Peschio, et le maximum entre la vallée du Galeizon et la tourbière de la Lande (Annexe 7).

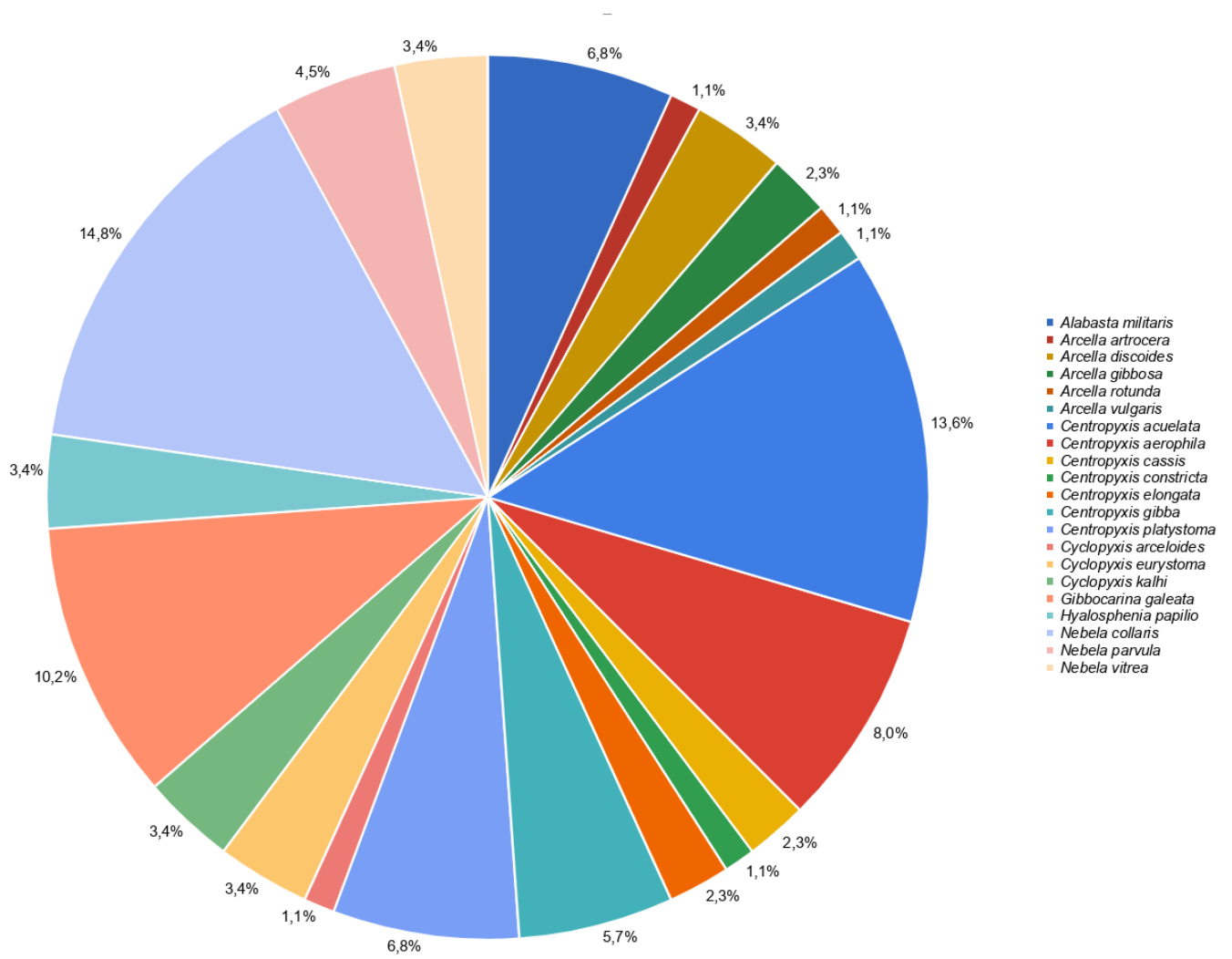


Figure 3. Proportion de chaque espèce de rhizopodes à 4-5 cm de profondeur dans la tourbière du Peschio

Table 1. Inventaires des rhizopodes dans différents milieux tourbeux au sud de la France : vallée du Galeizon (GAL, [Minana et al., 2012](#)) ; La Lande, Mont Caroux (TDL, [Enjalbert et al., 2016](#)) ; Lapsou, Cantal (LAP, [Docquier & Terreaux de Félice, 2017](#)) ; Canroute, monts de Lacaune (CAN, [Bertin & Durieux, 2018](#)) ; Peschio, Mont Lozère (ce travail). La colonne Long indique la longueur des thèques (en μm).

Famille	Espèce	Long	GAL	TDL	LAP	CAN	PES	Milieu de vie
Amphitrematidae	<i>Amphitrema wrightianum</i>	61-95		x				Tourbière à sphaignes
	<i>Archerella flavum</i>	45-77		x			x	Tourbière à sphaignes
Arcellidae	<i>Arcella arenaria</i>	75-130				x		Tourbière à sphaignes ; mousses (<i>Hypnum</i> , <i>Polytrichum</i>), lichens corticoles
	<i>Arcella artocrea</i>	152-216				x	x	Tourbière à sphaignes
	<i>Arcella catinus</i>	73-140		x				Tourbière à sphaignes et eau courante
	<i>Arcella discoides</i>	70-157	x	x			x	Tourbière à sphaignes, limon et végétation des eaux stagnantes
	<i>Arcella gibbosa</i>	79-111					x	Tourbière à sphaignes et eau douce
	<i>Arcella hemisphaerica</i>	38-80	x	x				Tourbière à sphaignes et eau douce
	<i>Arcella rotundata</i>	47-62					x	Tourbière à sphaignes
	<i>Arcella vulgaris</i>	80-150					x	Tourbière à sphaignes, limon et végétation des eaux stagnantes
Assulinidae	<i>Assulina minor</i>	30-40			x			Tourbière à sphaignes
	<i>Assulina muscorum</i>	33-60	x	x		x		Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Assulina seminulum</i>	60-150				x		Tourbière à sphaignes
	<i>Placocista spinosa</i>	105-145		x				Tourbière à sphaignes
Centropyxidae	<i>Centropyxis aculeata</i>	92-178	x			x	x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; limon des fossés et des lacs
	<i>Centropyxis aerophila</i>	42-85					x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Centropyxis cassis</i>	60-117	x					Tourbière à sphaignes
	<i>Centropyxis constricta</i>	90-150				x	x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Centropyxis ecornis</i>	119-316			x			Tourbière à sphaignes
	<i>Centropyxis elongata</i>	56-75					x	Tourbière à sphaignes, sol et humus
	<i>Centropyxis gibba</i>	96-114					x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Centropyxis platystoma</i>	60	x	x	x	x	x	Tourbière à sphaignes
Cryptodiffugiidae	<i>Cryptodiffugia crenulata</i>	17-20		x				Tourbière à sphaignes et autres mousses ; plantes aquatiques immergées
	<i>Cryptodiffugia oviformis</i>	14-35				x		Tourbière à sphaignes
	<i>Cryptodiffugia sacculus</i>	20-28		x				Tourbière à sphaignes et autres milieux humides
	<i>Cryptodiffugia</i> sp.					x		Tourbière à sphaignes
Cyphoderiidae	<i>Campascus minutus</i>	64-71			x			Tourbière à sphaignes et autres milieux humides
Diffugiidae	<i>Diffugia bryophila</i>	78-138		x				Tourbière à sphaignes
	<i>Diffugia globulosa</i>	91-155	x	x				Tourbière à sphaignes, étang oligotrophe
	<i>Diffugia leydi</i>	92-116		x				Tourbière à sphaignes, étangs
	<i>Diffugia lucida</i>	64-70	x					Milieux humides
	<i>Diffugia oblonga</i>	110	x	x		x		Tourbières ; sédiments d'étangs, de fossés ; sol humide
	<i>Diffugia pristis</i>	45-65	x	x		x		Tourbière à sphaignes et eau libre
	<i>Diffugia pulex</i>	30	x	x				Tourbière à sphaignes
	<i>Diffugia rubescens</i>	65-105				x		Tourbière à sphaignes
	<i>Diffugia</i> sp.					x		Tourbière à sphaignes

Euglyphidae	<i>Euglypha compressa</i>	70-132				x	Tourbière à sphaignes
	<i>Euglypha cristata</i>	33-70				x	Tourbière à sphaignes
	<i>Euglypha rotunda</i>	50-60	x	x		x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; sédiments lacustres
	<i>Euglypha</i> sp.(1)					x	
	<i>Euglypha</i> sp.(2)					x	
	<i>Euglypha strigosa</i>	60-100	x	x			Tourbière à sphaignes et autres mousses ; sédiments ; plantes aquatiques
	<i>Euglypha tuberculata</i>	55-100	x	x		x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; sédiments ; plantes aquatiques
Heleoperidae	<i>Heleopera petricola</i>	70-150				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; marécages
	<i>Heleopera rosera</i>	90-135				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; marécages
	<i>Heleopera sphagni</i>	87-168				x	Tourbière à sphaignes
	<i>Heleopera sylvatica</i>	50-75	x			x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
Hyalospheniidae	<i>Alabasta militaris</i>	50-82	x		x	x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; marécages
	<i>Gibbocarina galeata</i>	180 -283				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses ; marécages
	<i>Hyalosphenia elegans</i>	75-116			x		Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Hyalosphenia minuta</i>	26-43			x		Tourbière à sphaignes
	<i>Hyalosphenia papilio</i>	110-140				x	Tourbière à sphaignes ; marais
	<i>Hyalosphenia platystoma</i>	45			x		Entre les sédiments des types d'eau oligotrophes et mésotrophes.
	<i>Hyalosphenia subflava</i>	53-70			x		Tourbière à sphaignes
	<i>Nebela bohémica</i>	85-125	x				Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Nebela collaris</i>	109-112	x		x		Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Nebela lageniformis</i>	120-125				x	Tourbière à sphaignes
	<i>Nebela parvula</i>	115-161	x			x	Tourbière à sphaignes
	<i>Nebela tinctoria</i>	90-95	x	x	x	x	Tourbière à sphaignes
	<i>Nebela tubulosa</i>	190-264	x	x	x		Tourbière à sphaignes et milieux humides
	<i>Nebela vitrea</i>	95-120	x	x		x	Tourbière à sphaignes
	<i>Nebela wailesi</i>	170	x				Tourbière à sphaignes
<i>Quadrullela symmetrica</i>	72-85	x		x		Tourbière à sphaignes et autres mousses ; eau libre, litière forestière, sol	
Netzeliidae	<i>Cyclopyxis arcelloides</i>	100-110	x	x	x		Tourbière à sphaignes et autres mousses submergées
	<i>Cyclopyxis eurystoma</i>	34-46				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Cyclopyxis kalhi</i>	77-105				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses
	<i>Cyclopyxis</i> sp.					x	Tourbière à sphaignes
Phryganellidae	<i>Phryganella acropodia</i>	30-50	x	x	x		Tourbière à sphaignes et milieux humides
Pseudodiffugiidae	<i>Pseudodiffugia ascicularis</i>	17-50					Tourbière à sphaignes
	<i>Pseudodiffugia fulva</i>	30	x	x			Tourbière à sphaignes et milieux humides
Sphenoderiidae	<i>Sphenoderia lenta</i>	30	x	x	x		Tourbière à sphaignes et autres mousses
Trigonopyxidae	<i>Tracheleuglypha dentata</i>	40	x				Tourbière à sphaignes et autres mousses ; sol, limon et plantes aquatiques
	<i>Tracheleuglypha</i> sp.					x	
	<i>Trigonopyxis arcula</i>	80-170				x	Tourbière à sphaignes et autres mousses, sol forestier acide et litière
	<i>Trigonopyxis minuta</i>	80-170				x	Tourbière à sphaignes
Trinematidae	<i>Corythion</i> sp.		x				Limon et plantes aquatiques

DISCUSSION

1- Diversité des rhizopodes de la tourbière du Peschio

Communauté moderne de rhizopodes

La communauté actuelle de rhizopodes de la tourbière du Peschio comprend 21 espèces, parmi lesquelles trois (*Centropyxis aculeata*, *Gibbocarina galeata* et *Nebela collaris*) représentent 38,6% des individus présents (Fig. 3). Le test de diversité de Shannon donne une idée plus précise du nombre d'espèces de ce milieu et de la répartition des individus au sein de ces espèces. L'indice est ici de 2,75, ce qui confirme que la répartition des individus au sein des espèces n'est pas homogène. Les rhizopodes qui forment la communauté recensée permettent d'évaluer un pH compris entre $3,60 \pm 0,30$ (*Alabasta militaris*) et $6,20 \pm 1,10$ (*Centropyxis aerophila*) (Lamentowicz et al., 2005 ; Table 2). La moyenne pondérée de l'ensemble des taxons pour lesquels nous avons une valeur donne une estimation du pH de la tourbière à 4,70. Cette estimation correspond bien aux données géologiques, puisque le substratum géologique est une roche magmatique acide (D'Oliveira & Zitouni, 2021).

Absence de rhizopode en profondeur

Contrairement au niveau de surface, aucun thécamoebien n'a été observé à 42-43 cm de profondeur (env. 440 cal. BP). Cette absence peut être due à deux choses : soit les thécamoebiens n'étaient pas présents dans l'écosystème, soit leurs thèques n'ont pas été conservées. Warner & Charman (1994) ont montré que les thécamoebiens sont présents dans une large gamme de milieux humides (tourbières, lacs, flaques, etc.). Il semble donc que la deuxième hypothèse soit à privilégier.

D'après Lousier & Parkinson (1981), l'effet des variations causées par les conditions climatiques est négligeable sur la

décomposition des thèques. En revanche, la chimie, l'hydrologie, l'abondance des communautés bactériennes, le type de végétation, les activités anthropiques et le temps influencent les conditions de préservation des tests. Ces facteurs doivent être à un certain équilibre pour une bonne conservation des thèques (Swindles & Roe, 2007).

Actuellement, une activité d'élevage est présente autour du site étudié. Or, l'élevage conduit à des dégradations des tourbières (Josien & Tort, 1994). Les données des palynomorphes non polliniques (Bombeau & Musco de Caires, 2021) montrent qu'il y a un taux élevé de spores coprophiles aux alentours de 450 cal. BP. Cela suggère qu'il y avait déjà une activité pastorale dans la région à cette époque. Cela peut être une des raisons de la non-préservation des thèques.

De plus, des données concernant la ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique) située sur le versant sud du Mont Lozère indiquent qu'un drainage ancien a modifié le fonctionnement hydraulique de certaines tourbières dans le Parc National des Cévennes (DREAL Occitanie, 2016). Malheureusement, nous ne sommes pas parvenus à obtenir des informations sur les limites géographiques et chronologiques de ce drainage. Mais il est possible que ce dernier ait concerné notre zone d'étude. Ce type de travaux, agissant sur les niveaux de nappe phréatique, aurait pu altérer les conditions physico-chimiques de la tourbière, et perturber ainsi la préservation des thèques de rhizopodes dans la séquence tourbeuse. Les variations de la nappe phréatique peuvent aussi provoquer une augmentation de l'activité bactérienne du sol. Or, l'influence de l'humidité du sol sur l'activité bactérienne peut avoir un effet important sur la détérioration des thèques (Lousier & Parkinson, 1981).

Table 2. Fréquence d'occurrence, abondance relative et préférences écologiques des espèces des rhizopodes pour la profondeur de la nappe phréatique et le pH dans les tourbières à sphaignes du nord-ouest de la Pologne (d'après *Lamentowicz et al. 2005*).

Taxon	Abondance relative			Prof. nappe eau		pH	
	n	Moy	E-T	Optimum	Tolérance	Optimum	Tolérance
<i>Alabasta militaris</i>	7	2,5	10	25,0	11,0	3,60	0,30
<i>Amphitrema stenostoma</i>	3	0,3	1,2	-0,6	2,6	4,10	0,23
<i>Amphitrema wrightianum</i>	7	2,5	8,4	0,4	4,0	4,00	0,27
<i>Arcella catinus</i> -type	12	4,8	14	24,0	13,0	4,40	1,00
<i>Arcella discoides</i> -type	18	21	51	1,2	3,2	4,10	0,36
<i>Arcella gibbosa</i> -type	4	1,6	5,8	3,2	3,1	4,20	0,10
<i>Arcella</i> sp.	2	0,1	0,7	24,0	21,0	4,00	0,33
<i>Arcella vulgaris</i>	8	2,9	12	23,0	21,0	4,70	1,50
<i>Archerella flavum</i>	14	17	34	5,8	5,2	4,10	0,28
<i>Assulina muscorum</i>	27	19	32	31,0	15,0	3,90	0,72
<i>Assulina seminulum</i>	14	2,2	5,8	28,0	19,0	3,70	0,31
<i>Bullinularia indica</i>	5	0,3	0,7	33,0	24,0	3,70	0,47
<i>Centropyxis aculeata</i> -type	3	0,6	3,2	4,0	3,5	5,70	1,60
<i>Centropyxis aerophila</i>	4	0,5	2,5	22,0	13,0	6,20	1,10
<i>Centropyxis ecomis</i>	2	2,1	14	25,0	14,0	6,40	0,22
<i>Centropyxis hirsuta</i>	2	1,7	11	5,2	7,1	6,70	0,11
<i>Centropyxis platystoma</i> -type	2	0,1	0,50	5,8	0,7	5,00	1,70
<i>Corythion dubium</i>	5	2,2	7,7	30,0	18,0	3,60	0,27
<i>Corythion-Trinema</i> -type	4	0,1	0,4	33,0	13,0	3,50	0,28
<i>Cryptodifflugia oviformis</i>	2	0,0	0,2	41,0	22,0	3,30	0,06
<i>Cyclopyxis arcelloides</i> -type	11	3,8	14	2,2	6,5	4,20	0,18
<i>Cyphoderia ampulla</i>	1	0,0	0,2	5,0	**	6,70	**
<i>Cyphoderia trochus</i>	1	0,0	0,3	5,0	**	6,70	**
<i>Difflugia elegans</i>	1	0,0	0,3	1,0	**	4,40	**
<i>Difflugia globulosa</i>	1	0,5	3,0	-3,0	**	3,90	**
<i>Difflugia leidy</i>	6	0,7	2,8	0,90	5,4	4,00	0,12
<i>Difflugia lucida</i>	1	0,2	1,2	-3,0	**	3,90	**
<i>Difflugia</i> sp.	1	0,0	0,3	50,0	**	3,30	**
<i>Euglypha ciliata</i>	1	0,1	0,6	55,0	**	3,30	**
<i>Euglypha compressa</i>	2	0,1	0,6	7,4	0,7	4,40	0,39
<i>Euglypha rotunda</i> -type	8	0,8	2,1	38,0	20,0	3,80	0,92
<i>Euglypha</i> sp.	2	0,2	0,7	40,0	25,0	3,30	0,02
<i>Euglypha strigosa</i>	3	0,2	1,0	35,0	25,0	3,50	0,47
<i>Euglypha tuberculata</i> -type	18	3,7	8,1	33,0	19,0	3,70	0,42
<i>Heleopera petricola</i>	16	4,7	10	15,0	12,0	4,00	0,61
<i>Heleopera rosea</i>	1	0,1	0,9	25,0	**	6,40	**
<i>Heleopera sphagnii</i>	11	0,5	1,4	11,0	9,6	4,10	0,70
<i>Heleopera sylvatica</i>	3	0,4	1,2	42,0	11,0	3,60	0,35
<i>Hyalosphenia elegans</i>	13	13	29	7,8	5,4	4,00	0,29
<i>Hyalosphenia papilio</i>	24	35	53	14,0	8,4	4,30	0,86
<i>Nebela bohémica</i>	2	0,1	0,4	10,0	7,1	6,60	0,11
<i>Nebela carinata</i>	3	0,4	2,0	1,2	4,0	4,20	0,23
<i>Nebela collaris</i>	2	0,2	1,0	24,0	9,9	3,80	0,02
<i>Nebela flabellulum</i>	1	0,0	0,2	24,0	**	3,40	**
<i>Nebela griseola</i> -type	10	1,3	3,1	8,0	8,2	3,80	0,28
<i>Nebela langeniformis</i>	1	0,2	1,2	5,0	**	6,70	**
<i>Nebela parvula</i>	12	1,2	2,6	24,0	18,0	4,00	0,89
<i>Nebela</i> sp.	7	0,3	0,9	16,0	17,0	4,50	1,40
<i>Nebela tincta</i>	14	1,3	2,9	27,0	17,0	3,80	0,63
<i>Quadrurella symmetrica</i>	1	0,0	0,2	5,0	**	6,70	**
<i>Sphenoderia lenta</i>	1	0,0	0,3	5,0	**	6,70	**
<i>Trigonopyxis arcula</i>	8	1,3	4,2	31,0	15,0	3,70	0,28

En outre, [Lousier & Parkinson \(1981\)](#) ont remarqué un taux de détérioration des thèques très élevé après stérilisation de leurs échantillons en les chauffant à 80°C. En revanche, [Coûteaux \(1976\)](#), après stérilisation des échantillons aux rayons X, n'observe pas de détérioration. Les deux expériences diffèrent seulement par les méthodes de stérilisation utilisées. Cela suggère que les fortes températures peuvent créer des faiblesses dans les structures des thèques et augmenter leur décomposition naturelle. Il est possible que l'absence de rhizopodes à 42-43 cm de profondeur soit dû à la méthode d'extraction à haute température que nous avons réalisée en laboratoire ou à un incendie. Les données anthracologiques ([Cornet & Wales, 2020](#) ; [Charieau & Larrieu, 2021](#)) révèlent un incendie local vers 400 cal. BP. Cet événement de feu serait la conséquence de la reprise de l'activité agropastorale dans cette région, avec une anthropisation maximale à cette période ([Servera Vives, 2014](#)). Il aurait pu affecter la tourbière, et altérer ainsi la conservation des thèques de rhizopodes en surface. Les études palynologiques conduites sur les tourbières du Mont Lozère (Les Nassettes ou le Peschio) confirment l'activité anthropique régionale, avec notamment l'augmentation de *Juglans* ([Reille, 1988](#) ; [Pulido Avila, 2006](#)). Le développement de ces activités, du fait d'une agriculture sur brûlis et d'un fort déboisement, a eu par la suite des répercussions significatives sur le milieu ([Reille, 1988](#)).

2- Diversité inter-sites des rhizopodes

Indice de diversité Jaccard et Sorensen

L'inventaire réalisé a permis d'identifier 16 familles, 23 genres et 76 espèces de thécamoebiens qui sont ou ont été présents dans certaines zones humides du Sud de la France : vallée du Galeizon, tourbière de la Lande (Caroux), tourbière de Lapsou (Cantal), tourbière de Canroute (Monts de Lacaune) et tourbière du Peschio (Mont Lozère). Les indices de Sorensen et de Jaccard permettent de rendre compte de l'homogénéité ou au contraire de

l'hétérogénéité de la biodiversité thécamoebienne entre les sites. Les indices de Jaccard, compris entre 0,00 et 0,29 montrent que les espèces présentes d'une zone humide à l'autre sont différentes. Les indices de Sorensen, compris entre 0,00 et 0,45 sont éloignés de 1,00 : ils confirment que les espèces entre les différents sites étudiés sont majoritairement différentes.

Chaque site présente une ou plusieurs espèces spécifique(s) : *Diffflugia globulosa*, *Euglypha rotunda* et *E. strigosa* dans la vallée du Galeizon ; *Diffflugia rubescens* et *Pseudodiffflugia fulva* dans la tourbière de la Lande ; *Assulina minor*, *Centropyxis ecornis*, *Campascus minutus*, *Euglypha* sp.(1), *Euglypha* sp.(2), *Nebela tubulosa* et *Sphenoderia lenta* dans la tourbière de Lapsou ; *Arcella arenaria*, *Assulina seminulum*, *Cryptodiffflugia oviformis* et *Euglypha tuberculata* dans la tourbière de Canroute ; enfin, *Arcella discoides*, *A. gibbosa*, *A. rotundata*, *A. vulgaris*, *Archerella flavum*, *Centropyxis aerophila*, *C. constricta*, *C. elongata*, *C. gibba*, *Cyclopyxis eurystoma*, *Gibbocarina galeata*, *Hyalosphenia papilio* et *Nebela parvula* n'ont été observés que dans la tourbière du Peschio. Plusieurs facteurs peuvent être responsables de l'hétérogénéité des assemblages de rhizopodes entre les différents sites étudiés :

- Les espèces de sphaignes diffèrent d'un site à l'autre : par exemple, on trouve *Sphagnum auriculatum* et *S. subnitens* dans la vallée du Galeizon ([Minana et al., 2012](#)), et *S. capillifolium*, *S. contortum*, *S. magellanicum*, *S. palustre*, *S. russowii*, *S. subnitens* et *S. subsecundum* à Lapsou ([Docquier & Terreaux de Félice, 2017](#)). Différentes espèces de rhizopodes pourraient privilégier différentes espèces de sphaignes.
- Le niveau de la nappe phréatique est différent entre les sites, ce qui modifie par ailleurs la conductivité du sol ([Marcisz et al., 2020](#)).
- La composition minéralogique peut être différente entre les sites, ce qui modifie la disponibilité des minéraux pour la formation des tests ([Delaine, 2016](#)).
- Les zones humides ont un pH différent et

les espèces de rhizopodes ont chacune des préférences concernant l'acidité de leur habitat (Lamentowicz et al., 2005).

- L'alimentation en eau des sites est différente. Par exemple, la tourbière du Lapsou est partiellement ombrotrophe (Docquier & Terreaux de Félice, 2017), alors que les autres sont minérotrophes.

En revanche, 2 espèces sont présentes sur 4 des 5 sites étudiés : *Alabasta militaris* et *Nebela collaris*. Ces deux espèces semblent cosmopolites : on les trouve en Pologne (Lamentowicz et al., 2005) et en République démocratique du Congo (Van Oye, 1958), par exemple. Il serait intéressant de réaliser des études supplémentaires pour déterminer précisément les conditions physico-chimiques des tourbières, qui pourraient expliquer le caractère spécifique de certaines espèces de rhizopodes, et permettre d'associer des assemblages d'espèces à des conditions écologiques précises.

Nous avons également réalisé une analyse factorielle de correspondance (AFC) (Fig. 4) pour évaluer la ressemblance entre les différents sites. Les points les plus éloignés sont les sites ayant le plus de différences concernant les espèces présentes. La tourbière du Peschio se trouve à l'écart des autres tourbières, particulièrement par rapport à celles de la Lande et de Lapsou. Le site de la vallée du Galeizon est positionné sur l'axe 1, entre les points des autres sites. Ceci révèle la présence de plusieurs espèces communes à ce site et aux autres (*Alabasta militaris*, *Centropyxis platystoma*, *Nebela tinctoria* ou *N. vitrea*).

3- Limites de l'étude

Biais d'identification

Nos résultats peuvent être biaisés par nos identifications. Nous avons déterminé les amibes principalement à l'aide de leurs thèques sur un microscope optique. Cette méthode est moins coûteuse, mais Meisterfeld & Mitchell (2008) ont montré qu'elle ne permet pas une bonne identification.

Comparaison inter-sites

Il aurait été intéressant de poursuivre les analyses inter-sites à des âges similaires pour comparer les paléoassemblages de rhizopodes dans les différents milieux. Pour voir si les différents sites avaient déjà une hétérogénéité dans leurs assemblages de rhizopodes ou non. Il aurait été intéressant de pouvoir analyser statistiquement des données quantitatives et qualitatives sur les espèces entre les différents sites.

Si nous avions déterminé les caractéristiques physico-chimiques précises (par exemple : le pH, le niveau de la nappe phréatique) des différents sites, nous aurions pu pousser notre analyse factorielle de correspondance. Ces résultats auraient pu nous renseigner sur la répartition des espèces en fonction des caractéristiques physico-chimiques.

Nous aurions aussi pu réaliser une analyse en composante principale, afin d'observer l'association des différentes espèces entre elles. Dans ce dernier cas, nous aurions pu, en comparant différents sites, voir apparaître des corrélations (si l'espèce A est présente, l'espèce B a tendance à l'être aussi) et anti-corrélations (s'il y a l'espèce A, il n'y a pas l'espèce B).

CONCLUSION

Le pH de la tourbière du Peschio a été estimé à environ 4,7 sur la base des préférences écologiques des taxons recensés. Cette estimation est confortée par le fait que la tourbière se situe sur une roche mère magmatique acide. L'absence de thèques de rhizopodes à 42-43 cm de profondeur suggère une possible dégradation des assemblages microfossiles, peut-être en lien avec de l'agriculture sur brûlis (Reille, 1988) et/ou du pâturage (Bombeau & Musco de Caires, 2021). Il serait utile de continuer l'analyse sur les niveaux inférieurs afin de vérifier cette hypothèse et de tester le pH exact de la tourbière, afin de tester la méthode de recpnstitution utilisée.



Figure 4. Analyse factorielle de correspondance (AFC) des différents sites en fonction des espèces présentes

La diversité actuelle des thécamoebiens dans la tourbière du Peschio n'est pas homogène : trois espèces prédominent (*Centropyxis aculeata*, *Gibbocarina galeata* et *Nebela collaris*). La comparaison de plusieurs tourbières du sud de la France montre que les assemblages de thécamoebiens varient fortement d'un site à l'autre. Ces assemblages semblent dépendre de conditions physico-chimiques locales, vraisemblablement hétérogènes à l'échelle régionale. Il serait intéressant de compléter les prélèvements

dans d'autres tourbières de la région pour affiner la connaissance des communautés de rhizopodes du sud de la France.

REFERENCES

- Aoki Y., Hoshino M. & Matsubara T. (2007). Silica and testate amoebae in soil under pine-oak forest. *Geoderma*, 142 : 29-35.
- Armynot du Châtelet E., Guillot F., Recourt P., Ventalon S. & Tribovillard N. (2010). Influence of sediment grain size and

- mineralogy on testate amoebae test construction. *Comptes Rendus Geoscience*, 342 (9) : 710-717.
- Bertin G & Durieux T. (2018). Variation des conditions environnementales de la tourbière de Canroute (France) au cours des 7700 dernières années : apport de l'étude des rhizopodes. *Orpalm Synthesis*, 12 (1) : 41-52.
- Bombeau A. & Musco de Caires C. (2021). Palynomorphes non-polliniques holocènes et modernes de la tourbière du Peschio (Lozère, France) : utilisation des spores coprophiles, saprophiles et des microalgues pour reconstruire les paléoenvironnements et le pastoralisme. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 93-108.
- Bonnet L. (1976). Ecologie des thécamoebiens des sols calcaires. In : 1er Symposium International sur la Taxonomie et l'Écologie des Thécamoebiens, Sofia (Bulgarie).
- Bonnet L. Gomez-Sanchez M.-S. (1994). Thécamoebiens édaphiques (Rhizopoda, Arcellinida) à distribution géographique restreinte en Asturies et dans le Sud-Ouest de la France. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 130 : 7-14.
- Booth R.K. (2001). Ecology of testate amoebae (protozoa) in two lake superior coastal wetlands: Implications for paleoecology and environmental monitoring. *Wetlands*, 21 : 564-576.
- Booth R.K., Sullivan M.E. & Sousa V.A. (2008). Ecology of testate amoebae in a North Carolina pocosin and their potential use as environmental and paleoenvironmental indicators. *Ecoscience*, 15 : 277-289.
- Charieau F. & Larrieu M. (2021). Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 55-73.
- Cornet F. & Wales A. (2020). Reconstitution des paléo-incendies du Mont Lozère (Cévennes, France) du Tardiglaciaire à nos jours. *Orpalm Synthesis*, 13 (1) : 9-24.
- Coûteaux M.-M. (1976). *Dynamisme de l'équilibre des thécamoebiens dans quelques sols climaciques*. Mémoires du Musée d'Histoire Naturelle (France), N.S. sér. A., Zoologie, 183 p.
- Coûteaux M.-M. & Pussard M. (1983). Nature du régime alimentaire des protozoaires du sol. New trends in Soil Biology. In: Lebrun P.(Ed), *Proceedings of the VIII Int. Colloquium of Soil Biology*. Dieu-Brichart, Louvain-la-Neuve, pp. 179-195.
- Cris R., Buckmaster S., Bain C. & Reed M. (2014). *Global Peatland Restoration demonstrating SUCCESS*. IUCN UK National Committee Peatland Programme, Edinburgh, 65 p.
- De Bello F., Lepš J. & Sebastià M.-T. (2007). Grazing effects on the species-area relationships: Variation along a climatic gradient in NE Spain. *Journal of Vegetation Science*, 18 : 25-34.
- Delaine M., Armynot du Châtelet E., Bout-Roumazeilles V., Goubert E., Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A. & Arthuis R. (2014). Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyzes: the infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *Holocene*, 25 : 407-420.
- Delaine M. (2016). *La composition des thèques d'amibes xénosomiques : utilisation potentielle comme bio-indicateur des dépôts de particules d'origine atmosphérique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 256 p.
- Docquier C. & Terreaux de Félice H. (2017). Reconstruction des variations hydrologiques d'une tourbière du Cantal (France) : environnement de dépôt et conservation des rhizopodes. *Orpalm Synthesis*, 10 (2) : 49-61.
- D'Oliveira L. & Zitouni A. (2021). Dynamique d'accumulation de tourbe dans le sud du Massif Central : focus sur la tourbière du Peschio (Mont Lozère). *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 21-36.
- DREAL Occitanie (2016). *Inventaire ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique) des Tourbières du versant nord du Mont Lozère*. Direction régionale de l'Environnement, de

- l'Aménagement et du Logement.
- Enjalbert E., Laviano F. & Morarin J. (2016). Paléohydrologie de la Tourbière de la Lande (Mont Caroux) : reconstitution basée sur l'étude des assemblages de rhizopodes. *Orpalm Synthesis*, 9 (1) : 47-59.
- Foissner W. (1997). Protozoa as bioindicators in agroecosystems, with emphasis on farming practices, biocides, and biodiversity. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 62 : 93-103.
- Gilbert D., Amblard C., Bourdier G., Francez A.-J. & Mitchell E. A. D. (2000). Le régime alimentaire des thécamoébiens. *L'Année Biologique*, 39 : 57-68.
- Golemansky V. (2008). Origin, Phylogenetic relations, and adaptations of the marine interstitial testate amoebae (Rhizopoda: Lobosea, Filosea, and Granuloreticulosea). *Advances in Arachnology and Developmental Biology*, 12 : 87-100.
- Gomaa F., Kosakyan A., Heger T., Corsaro D., Mitchell E.A.D. & Lara E. (2014). One Alga to Rule them All: Unrelated Mixotrophic Testate Amoebae (Amoebozoa, Rhizaria and Stramenopiles) Share the Same Symbiont (Trebouxiophyceae). *Protist*, 165 : 161-176.
- Hájek M., Horsák M., Hájková P. & Dítě D. (2006). Habitat diversity of central European fens in relation to environmental gradients and an effort to standardise fen terminology in ecological studies. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8 : 97-114.
- Josien E. & Tort M. (1994). Impact de l'environnement agricole sur une tourbière de maar ; conséquences pour sa protection. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 71 (3) : 324-336.
- Kajukała K., Fiałkiewicz-Kozieł B., Galka M., Kolaczek P. & Lamentowicz M. (2016). Abrupt ecological changes in the last 800 years inferred from a mountainous bog using testate amoebae traits and multi-proxy data. *European Journal of Protistology*, 55 (B) : 165-180.
- Lamentowicz M. & Mitchell E.A.D. (2005). The Ecology of Testate Amoebae (Protists) in *Sphagnum* in North-western Poland in Relation to Peatland Ecology. *Microbial Ecology*, 50 : 48-63.
- Lara E., Heger T.J., Ekelund F., Lamentowicz M. & Mitchell E.A.D. (2008). Ribosomal RNA Genes Challenge the Monophyly of the Hyalospheniidae (Amoebozoa: Arcellinida). *Protist*, 159 : 165-176.
- Littlewood N., Anderson P., Artz R., Bragg O., Lunt P. & Marrs R. (2010). *Peatland Biodiversity, a scientific review*. IUCN Peatland Programme, York, 42 p.
- Lousier J.D. & Parkinson D. (1981). The disappearance of the empty tests of litterand soil testate amoebae (Testacea, Rhizopoda, Protozoa). *Archiv für Protistenkunde*, 124 (3) : 312-336.
- Marcisz K., Jassey V.E.J., Kosakyan A., Krashevskaya V., Lahr D.J.G., Lara E., Lamentowicz Ł., Lamentowicz M., Macumber A., Mazei Y., Mitchell E.A.D., Nasser N.A., Patterson R.T., Roe H.M., Singer D., Tsyganov A.N. & Fournier B. (2020). Testate Amoeba Functional Traits and Their Use in Paleoecology. *Frontier in Ecology and Evolution*, 8 : 575966.
- Meisterfeld R. & Mitchell E. (2008). *Arcellinida* Kent 1880. Testate Lobose Amoebae. Version 02 September 2008 in The Tree of Life Web Project, <http://tolweb.org/>
- Minana E., Mistral A. & Valla T. (2012). Assemblages des thécamoébiens des zones humides de la vallée du Galeizon. *Orpalm Synthesis*, 5 : 49-62.
- Mitchell E.A.D., Butler A., Warner B. & Gobat J. (1999). Ecology of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in *Sphagnum* peatlands in the Jura mountains, Switzerland and France. *Ecoscience*, 6 (4) : 565-576.
- Mitchell E.A.D., Payne R.J., O. van der Knaap W., Lamentowicz L., Gabka M. & Lamentowicz M. (2013). The performance of single- and multi-proxy transfer functions (testate amoebae, bryophytes, vascular plants) for reconstructing mire surface wetness and pH. *Quaternary Research*, 79 : 6-13.
- Ogden C.G. & Hedley R.H. (1980). *An atlas*

- of freshwater testate amoebae*. Oxford University Press, New York, 222 p.
- Opravilova V. & Hajek M. (2016). The variation of testacean assemblages (Rhizopoda) along the complete base-richness gradient in fens: A case study from the Western Carpathians. *Acta Protozoologica*, 45 : 191-204.
- Ponge J.F., Vannier G., Arpin P. & David J.F. (1986). Caractérisation des humus et des litières par la faune du sol : intérêt sylvicole. *Revue Forestière Française*, 38 (6) : 509-516.
- Pulido Avila M.G. (2006). *Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique postglaciaire de la végétation dans le sud du massif central, France*. Thèse de doctorat. Université d'Aix Marseille, 308 p.
- Reille M. (1988). Analyse pollinique de la tourbière des Nassettes, Mont Lozère (France). Réponse à quelques questions biogéographiques. *Revue du Gévaudan*, 2 : 3-7.
- Roberts N. (2013). *The Holocene: An Environmental History, 3rd edition*. Wiley-Blackwell, Hoboken, 376 p.
- Schmitt A.R., Girard V., Perrichot V. & Sschönborn W. (2010). Testate amoebae from a Cretaceous forest floor microbiocoenosis of France. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*, 57 (3) : 245-249.
- Servera Vives G., Miras Y., Riera S., Julià R., Allée P., Orengo H., Paradis-Grenouillet S. & Palet J.M. (2014). Tracing the land use history and vegetation dynamics in the Mont Lozère (Massif Central, France) during the last 2000 years: The interdisciplinary study case of Countrasts peat bog. *Quaternary International*, 353 : 123-139.
- Smith H.G., Bobrov A. & Lara E. (2008). Diversity and biogeography of testate amoebae. *International journal of Biodiversity and Conservation*, 17 (2) : 345-363.
- Stout J.D. (1968). The significance of the protozoan fauna in distinguishing mull and mor of beech (*Fagus silvatica* L.). *Pedobiologia*, 8 (3) : 387-400.
- Swindles G.T., Green S.M., Brown L., Holden J., Raby C., Turner E., Smart R., Peacock M. & Baird A. (2016). Evaluating the use of dominant microbial consumers (testate amoebae) as indicators of blanket peatland restoration. *Ecological Indicators*, 69 : 318-330.
- Van Oye P. (1958). Étude sur les Rhizopodes des marais du sud-ouest d'Uvira (Congo-belge). *Hydrobiologia*, 10 : 85-137.
- Warner B.G. & Charman D.J. (1994). Holocene changes on a peatland in north western Ontario interpreted from testate amoebae (Protozoa) analysis. *Boreas*, 23 (3) : 270-279.
- Warner B.G., Asada T. & Quinn N.P. (2007). Influences saisonnières sur l'écologie des amibes testiculaires dans une petite tourbière de sphaignes dans le sud de l'Ontario, Canada. *Microbial Ecology*, 54 : 91-100.

ANNEXE 1. Calcul de la concentration de rhizopodes par cm³

$$CR = \frac{SR \times LT \times VC}{LC \times VG \times VN}$$

- avec : SR, la somme de rhizopodes comptés ;
LT, le nombre de lignes totales sur une lamelle, soit 21 (déterminée manuellement au début du travail, au grossissement x20) ;
VG, le volume de la goutte déposée sur lame, soit 0,025 ml ;
LC, le nombre de lignes comptées par niveau ;
VC, le volume du culot dans les piluliers ;
VN, le volume du niveau échantillonné, soit 1 cm³.

ANNEXE 2. Calcul de l'indice de Shannon et de l'indice de Pielou :

$$H' = - \sum_{i=1}^R p_i \ln p_i$$

- avec : H', indice de biodiversité de Shannon
R, la richesse spécifique
p_i, proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces (R) dans le milieu d'étude,
p_i = n_i / N, avec n_i, le nombre d'individus pour l'espèce i et N, l'effectif total.

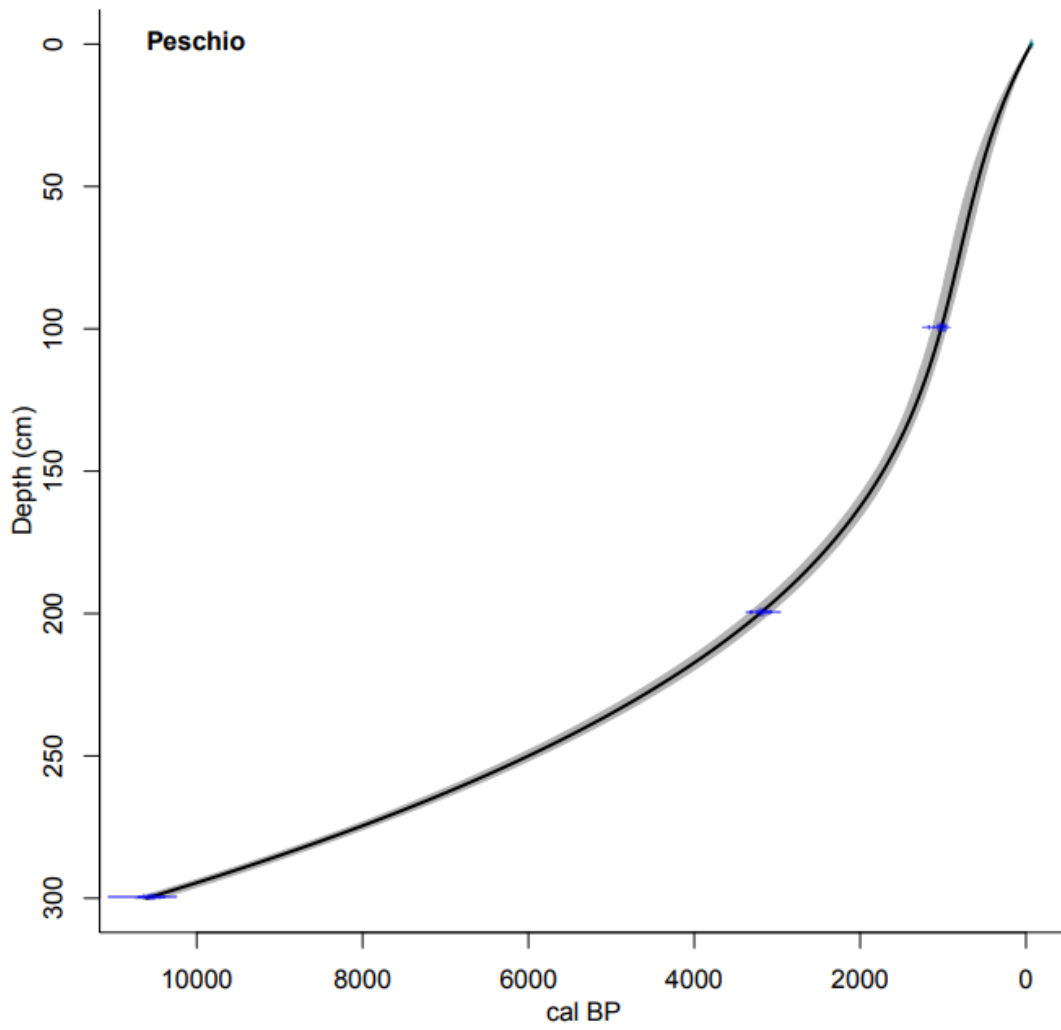
ANNEXE 3. Calcul de l'indice de Jaccard (J) : $J = a/(a + b + c)$

- avec : a, le nombre d'espèces communes aux deux habitats ;
b, le nombre d'espèces ne se trouvant que dans l'habitat 1 ;
c, le nombre d'espèces ne se trouvant que dans l'habitat 2.

ANNEXE 4. Calcul de l'indice de Sorensen (β) : $\beta = (2c)/(S1 + S2)$

- avec : c, le nombre d'espèces communes aux deux habitats ;
S1, le nombre d'espèces de l'habitat 1 ;
S2, le nombre d'espèces de l'habitat 2.

ANNEXE 5. Courbe modèle âge de la tourbière du Peschio



ANNEXE 6. Indice de Jaccard

	Galeizon	La Lande	Lapsou	Canroute	Peschio
Galeizon		0,29	0,20	0,14	0,16
La Lande	0,29		0,09	0,20	0,00
Lapsou	0,20	0,09		0,18	0,12
Canroute	0,14	0,20	0,18		0,10
Peschio	0,16	0,00	0,12	0,10	

ANNEXE 7. Indice de Sorensen

	Galeizon	La Lande	Lapsou	Canroute	Peschio
Galeizon		0,45	0,33	0,25	0,29
La Lande	0,45		0,17	0,33	0,00
Lapsou	0,33	0,17		0,30	0,22
Canroute	0,25	0,33	0,30		0,19
Peschio	0,29	0,00	0,22	0,19	

PALYNOMORPHES NON-POLLINIQUES HOLOCENES ET MODERNES DE LA TOURBIERE DU PESCHIO (LOZERE, FRANCE) : UTILISATION DES SPORES COPROPHILES, SAPROPHILES ET DES MICROALGUES POUR RECONSTRUIRE LES PALEOENVIRONNEMENTS ET LE PASTORALISME

Alice Bombeau ¹, Carlo Musco de Caires ²

*Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (UMR 5554)
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC065, 34095 Montpellier cedex 05, France*

¹ alice.bombeau@etu.umontpellier.fr, ² carlo.musco-de-caires@etu.umontpellier.fr

Encadrement : Lucas Dugerdil

Texte revu et corrigé par S.D. Muller

Citation : Bombeau A. & Musco de Caires C. (2021). Palynomorphes non-polliniques holocènes et modernes de la tourbière du Peschio (Lozère, France) : utilisation des spores coprophiles, saprophiles et des microalgues pour reconstruire les paléoenvironnements et le pastoralisme. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 93-108.

Résumé : Les palynomorphes non-polliniques (PNP) sont des marqueurs paléoenvironnementaux et indicateurs de conditions climatiques, de dynamiques paysagères et d'impacts anthropiques. Ils renseignent sur les modes de vie des populations humaines, notamment en informant sur l'activité pastorale. Cette étude se focalise sur la tourbière du Peschio (Lozère, France) et retrace l'histoire environnementale de l'Holocène. 22 PNP ont été sélectionnés pour leur écologie associée à du pastoralisme (coprophiles), des forêts (saprophiles) ou des eaux stagnantes (algues). 3 phases historiques ont été associées à des événements anthropiques et climatiques de la région. Nos résultats confirment l'utilité des PNP pour les reconstructions paléoenvironnementales, et présentent aussi leurs limites et l'intérêt de les coupler à des marqueurs polliniques afin d'améliorer la gestion des milieux naturels.

Mots clés : Cévennes, microfossiles, coprophile, saprophile, anthropisation

Abstract: *Holocene and modern non-pollen palynomorphs of Peschio peatland (Lozère, France): using coprophilous and saprophilous spores and microalgae to reconstruct palaeoenvironments and pastoralism.* Non-pollen palynomorphs (NPP) are palaeoenvironmental markers and indicators of climate conditions, landscape dynamics and anthropogenic impact. They provide information on the lifestyle of human populations, notably by informing about grazing. The present study focuses on the Peschio peatland (Lozère, France) and traces the environmental history of the Holocene. 22 NPP were selected for their ecology associated with pastoralism (coprophilous), forests (saprophilous), or stagnant water (algae). 3 historical phases have been associated with anthropogenic and climatic events in the region. Our results confirm the usefulness of NPP for palaeoenvironmental reconstructions, and present their limits and the interest to associate with pollen markers in order to improve the management of natural environments.

Keywords: Cévennes, microfossil, coprophilous, saprophilous, anthropisation

Pour mieux comprendre les dynamiques des milieux naturels sur le long terme et préciser l'influence du climat et des activités humaines, différentes méthodes de reconstitution paléoenvironnementale ont été développées au cours des dernières décennies (Abassi & Valensi, 1998 ; van Geel & Aptroot, 2006 ; Cugny et al., 2010 ; Baker et al., 2013). Pour les communautés végétales, la méthode de reconstitution paléoenvironnementale dominante est basée sur l'étude du pollen (van Geel, 2002 ; Miola, 2012). Les sédiments conservent toutefois d'autres microfossiles, appelés Palynomorphes Non-Polliniques ou PNP (van Geel, 2002). Ces PNP sont constitués d'une grande variété d'objets, incluant des spores de champignons, des restes d'invertébrés, ainsi que des colonies d'algues et de cyanobactéries (van Geel, 2002). L'étude des PNP permet de reconstituer divers paramètres locaux, comme le pH, la température, le type de végétation, le niveau d'eau et la couverture de glace du bassin versant entourant le site (Dendievel et al., 2019a). Elle renseigne également sur la nature ouverte ou forestière des paysages, ainsi que sur les activités anthropiques, notamment le pastoralisme. Les PNP dont l'écologie est coprophile sont en effet associés à des excréments d'herbivores (et donc à des activités pastorales), alors que les saprophiles se développent sur le bois mort ou en décomposition (Cugny et al., 2010 ; Baker et al., 2013).

Nous avons étudié les assemblages de PNP de la tourbière de Peschio (Mont Lozère, France) afin d'avoir une idée des paléoenvironnements de cette zone humide. Comme toutes les tourbières, cette dernière est une archive paléoenvironnementale, qui conserve dans la tourbe de nombreux microfossiles (Cugny et al., 2010). Notre travail vise à préciser en quoi les PNP sont des marqueurs à la fois indépendants et complémentaires à d'autres indicateurs paléoécologiques, et en quoi leur attribution à une écologie précise permet la reconstruction des conditions passées, de la dynamique paysagère et de l'impact anthropique.

LES PALYNOMORPHES NON-POLLINIQUES : DIVERSITE, INTERETS POUR LA PALEOECOLOGIE ET ETAT DES CONNAISSANCES DANS LE SUD DE LA FRANCE

1- Histoire de l'étude des PNP

L'étude des paléoenvironnements

L'étude des paléoenvironnements est un outil qui permet entre autres d'améliorer les prédictions sur les conséquences potentielles du changement climatique. Elle permet d'anticiper les changements qui impacteront la biosphère sur la base de la reconstitution de la réponse des organismes et écosystèmes face aux changements climatiques passés (Vegas-Vilarrubia et al., 2011). Les méthodes de reconstitution paléoenvironnementale reposent sur le principe d'actualisme, qui admet que l'écologie d'une espèce fossile est similaire à celle de la même espèce actuelle ou des espèces phylogénétiquement proches (Abassi & Valensi, 1998). Ce principe admet également que les lois écologiques actuelles sont les mêmes que par le passé (Abassi & Valensi, 1998). Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes d'étude des paléoenvironnements, chacune basée sur des biomarqueurs particuliers.

Les Palynomorphes Non-Polliniques : des marqueurs longtemps ignorés

Avant les années 1960, les palynologues travaillaient principalement sur le pollen et les spores. Un grand nombre de Palynomorphes Non-Polliniques (PNP), dont l'origine était inconnue, étaient ignorés. Toutefois, certains restes d'animaux et spores de champignons furent étudiés dès le début du 20^e siècle (Rudolph, 1917 ; Frey, 1960 ; Graham, 1962 ; Aartolahti, 1965). L'étude des PNP est toutefois longtemps demeurée anecdotique : l'identification des types de palynomorphes n'était pas reliée à leur organisme producteur. En effet, pour l'étude du pollen, les chercheurs ont commencé par observer des plantes puis le pollen qui leur correspondait avant de les répertorier pour les comparer au pollen fossile. Pour les PNP, l'étude des

organismes producteurs est plus complexe : il ne s'agit pas de macroorganismes dont la taxonomie est depuis longtemps connue. Les chercheurs qui s'y intéressent doivent procéder de manière inverse, ils observent en premier lieu ces microfossiles, puis essaient de les faire correspondre aux taxons associés (Cugny et al., 2010).

L'émergence des PNP

Ce n'est qu'en 1968, qu'un étudiant en Master, Bas Van Geel, a commencé à réaliser une étude systématique des PNP à l'*Institute for Biodiversity and Ecosystems Dynamics*

(IBED) à Amsterdam, Pays-Bas (van Geel, 2002 ; Miola, 2012). Il est le premier à décrire les différents palynomorphes et à donner un nom à chaque type (van Geel, 1972, 1978). Par la suite, ces PNP sont devenus le sujet de recherche d'autres palynologues qui ont participé à l'avancée des connaissances sur ce marqueur (Miola, 2012 ; Fig. 1). Le travail de Miola (2012), qui répertorie les travaux antérieurs effectués sur les PNP, rend désormais plus facile la correspondance entre les spores de champignon, leur organisme producteur et leur écologie.

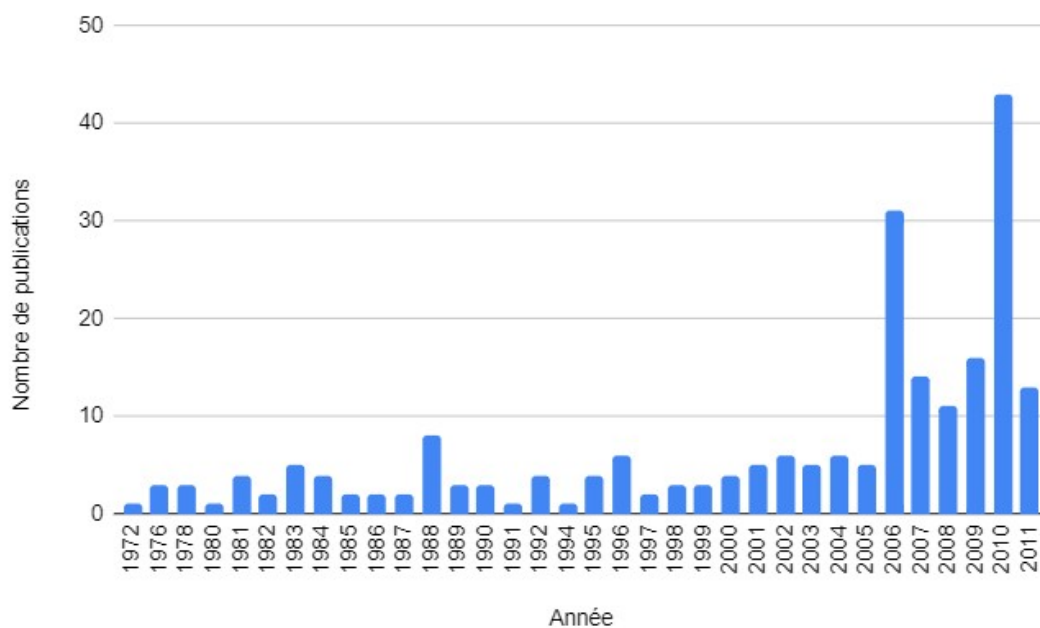


Figure 1. Évolution des études scientifiques des PNP de 1972 à 2011 (modifié d'après Miola, 2012)

2- Intérêts et diversité des PNP

Description des PNP

L'étude des PNP concerne une diversité d'organismes appartenant à différents groupes de champignons (spores, hyphes ou fructifications), d'invertébrés (cuticules, mandibules, œufs...), de microalgues et de cyanobactéries (van Geel, 2002). Les PNP peuvent être observés dans la litière, les coussinets de mousse, le bois mort, les sols ou l'eau stagnante (Cugny et al., 2010). À l'état fossile, on les trouve par exemple dans la tourbe (van Geel, 2002), les sédiments lacustres (Cugny et al., 2010) ou dans des

vestiges archéologiques (Milanesi et al., 2016).

Intérêts de ce marqueur pour les reconstitutions paléo environnementales

Les PNP se trouvent essentiellement dans deux catégories de milieu : des milieux naturels comme les lacs ou les tourbières (van Geel et al., 2002) et les sites archéologiques (Milanesi et al., 2016). Ils permettent la reconstruction de paléoenvironnements, et sont complémentaires les uns des autres, car ils apportent chacun des informations plus ou moins spécifiques (van Geel, 2002 ; Cugny et al., 2010). Par exemple, des spores de

champignons parasites de Poaceae peuvent indiquer que la zone étudiée était cultivée par l'homme, mais elle ne permet pas de savoir si c'était pour l'alimentation humaine ou pour le pâturage (Henry, 2020). Des spores de champignons coprophiles trouvées dans la même zone pourraient valider l'hypothèse du pastoralisme puisqu'ils renseignent sur la présence et l'abondance d'herbivores (Baker et al., 2013). L'intérêt de ce marqueur se trouve également dans le fait que beaucoup de PNP sont considérés comme cosmopolites, bien que la grande majorité des études soient centrées sur l'Europe du Nord et de l'Est (van Geel & Aptroot, 2006 ; Yeloff et al., 2007), et sur l'Amérique du Nord (Miola, 2012). Malgré l'avancée des connaissances, de nombreux PNP ne sont toujours pas identifiés et les études globales ne sont pas toujours parfaitement applicables à des échelles plus locales, comme dans les environnements méditerranéens (Cugny et al., 2010). De plus, les PNP sont utilisés dans le but d'apporter des informations complémentaires aux autres méthodes de reconstitution, car ils fournissent généralement des informations sur les activités anthropiques, pour lesquelles les charbons ou le pollen seuls ne sont pas suffisamment informatifs (van Geel, 2002).

Des indicateurs écologiques

Les PNP les plus étudiés sont les spores fongiques. Généralement présentes en quantité importante dans les dépôts tourbeux (van Geel & Aptroot, 2006), ce sont de bons indicateurs écologiques (van Geel, 2002 ; van Geel & Aptroot, 2006). Certains champignons sont parasites de plantes, comme quelques phragmoasporos parasites de *Carex* (Cugny et al., 2010). Certains champignons peuvent être associés à des bois vivants (par exemple, *Brachysporium*) ou à des bois morts ou en décomposition (les saprophiles, comme *Caryospora*) (Cugny et al., 2010). Les PNP peuvent également renseigner sur le type de substrats, comme *Cladosporium* qui se développe sur sol forestier (Cugny et al., 2010). Enfin, certaines ascospores de champignon sont liées aux excréments de certaines espèces animales, particulièrement des herbivores, et peuvent donc servir à

évaluer la présence de la faune passée : ce sont des taxons coprophiles (van Geel et al., 1983 ; Baker et al., 2013), comme les Phragmoconidies (Cugny et al., 2010). En révélant la présence locale d'herbivores, les champignons coprophiles indiquent que la zone étudiée a été utilisée pour de l'élevage ovin ou bovin (Cugny et al., 2010), et permettent d'estimer l'intensité du pâturage, celui-ci étant un des principaux facteurs de perturbation des écosystèmes naturels (Baker et al., 2013). L'évaluation de la pression pastorale est basée sur l'idée que la quantité de spores produites est fonction de la masse fongique, elle-même fonction de la quantité d'herbivores (Baker et al., 2013).

3- Limites et développement de l'étude des PNP

Malgré l'avancée des recherches qui visent à préciser l'écologie des divers PNP (Baker et al., 2013), certains restent mal définis et ne permettent pas toujours une reconstruction paléoenvironnementale précise (van Geel & Aptroot, 2006 ; Cugny et al., 2010). Certains PNP demeurent négligés et leur valeur indicatrice est débattue (Cugny et al., 2010). Cela est lié au fait que l'identification de ces microfossiles manque parfois de précision et qu'il peut être difficile de les associer à des organismes actuels (van Geel & Aptroot, 2006). C'est le cas par exemple de *Geoglossum*-type, dont l'écologie est inconnue (Cugny et al., 2010). A la difficulté d'identification intrinsèque aux PNP, s'ajoutent les paramètres taphonomiques classiques (décomposition, dégradation) qui peuvent entraîner des modifications de leur apparence (Prager et al., 2006).

Les PNP suscitent toutefois un intérêt croissant (Miola, 2012), car ils apportent des informations complémentaires à celles des autres biomarqueurs paléocéologiques : ils renseignent notamment sur la nature ouverte ou fermée du milieu et sur l'utilisation anthropique des terres, c'est-à-dire sur le mode de vie des populations humaines (Servera Vives et al., 2014).

MATERIEL ET METHODES

1- Zone d'étude

La tourbière du Peschio, située à 1370 m d'altitude, est localisée sur le flanc nord-ouest du Mont Lozère, dans le Parc National des Cévennes. Elle constitue une archive naturelle, qui, grâce à l'anoxie et à l'acidité de la tourbe, conserve depuis des millénaires de nombreux micro- et macrofossiles (Cugny et al., 2010). La tourbière minérotrophe est dominée par des sphaignes (*Sphagnum* spp.) et des herbacées (Poaceae, Cyperaceae et Juncaceae). Elle est entourée de reliefs couverts de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), localement associé au bouleau (*Betula pendula*) et au frêne (*Fraxinus excelsior*).

Le Parc Naturel des Cévennes n'est pas un sanctuaire de nature : l'agropastoralisme est intégré dans la conservation des paysages. La tourbière étudiée est pâturée par des troupeaux de bovins/ovins en été et parfois toute l'année. La périphérie de la tourbière est fauchée. L'écobuage est aussi parfois utilisé, malgré ses effets négatifs sur l'écologie de la tourbière. La tourbière du Peschio a depuis longtemps subi des pressions anthropiques, et la digue construite au cours du Moyen Âge illustre cette anthropisation (Pulido Avila, 2006).

2- Travail de terrain

Nous avons d'abord réalisé un relevé topographique du fond de la tourbière le long de plusieurs transects. Ensuite, deux carottages ont été effectués le 03/09/2020 au points les plus profonds (Fig. 2), à l'aide d'un carottier russe manuel, dont la chambre de prélèvement mesure 1 m de long pour 5 cm de diamètre. Nous avons prélevé les carottes A1/A2 dans un même trou, et B1/B2 dans un trou séparé, distant de 20 cm. Ces carottes ont permis d'obtenir une séquence composite de 292 cm (Fig. 3).

3- Travail de laboratoire

Échantillonnage des carottes

Des échantillons de 1 cm³ ont été prélevés aux profondeurs suivantes : 1-2, 42-43, 84-85, 126-127, 168-169, 210-211, 252-253, 298-299 cm.

Protocole d'extraction

Nous avons suivi le protocole de Berglund & Ralska-Jasiewiczova (1986) qui consiste à éliminer le sédiment par des attaques chimiques : l'acide chlorhydrique (HCl à 20%) pour éliminer les carbonates, l'acide fluorhydrique (HF à 70%) pour éliminer la silice, et l'hydroxyde de potassium (KOH à 10%) et l'acide sulfurique (H₂SO₄) pour éliminer la matière organique. L'acide sulfurique est utilisé durant une étape appelée acétylyse : de l'acide acétique est utilisé pour déshydrater les échantillons, qui sont ensuite plongés dans un liquide acétolysant (9 parts d'anhydride acétique à 97% pour une part d'acide sulfurique à 98%) pendant 2 min. à 90°C. Le culot obtenu a été dilué dans de la glycérine. Les lames ont été fixées avec de l'histolaque.

Identification et comptage

Les PNP ont été identifiés et comptés sous microscope optique (x 400), en se référant à la littérature (van Geel, 2002, 2006 ; Cugny et al., 2010). Pour calculer la concentration des PNP (nombre/cm³), nous avons réalisé le calcul suivant :

$$[PNP] = \frac{PNP_{\text{comptés}} \cdot n_{\text{tot}} \cdot V_{\text{culot}}}{n_{\text{lc}} \cdot V_{\text{goutte}} \cdot V_{\text{sédi}}}$$

avec : PNP comptés, nombre total de PNP comptés ; n_{tot}, nombre de lignes totales ; V_{culot}, volume du culot après ajout de glycérine ; n_{lc}, nombre de lignes comptées ; V_{goutte}, volume de la goutte (25 uL) ; V_{sédi}, volume sédimentaire avant traitement chimique (soit 1 cm³)

Afin de calculer l'influx, les concentrations obtenues ont été multipliées par le taux d'accumulation sédimentaire (TAS) correspondant aux profondeurs des échantillons.

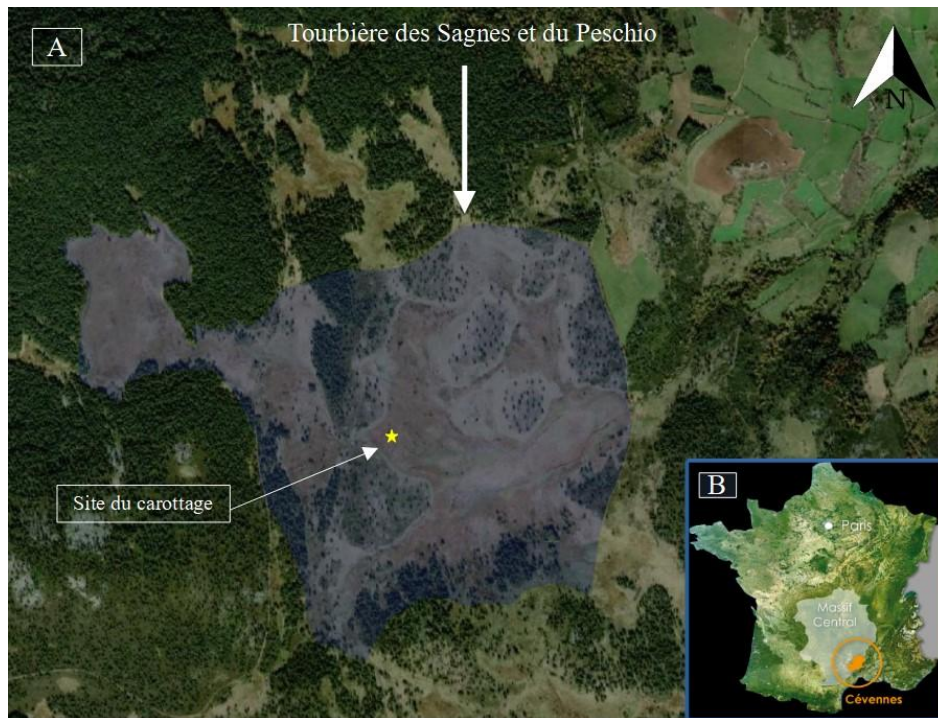


Figure 2. A) Limites des tourbières des Sagnes et du Peschio. B) Localisation des Cévennes. Etoile : site du carottage

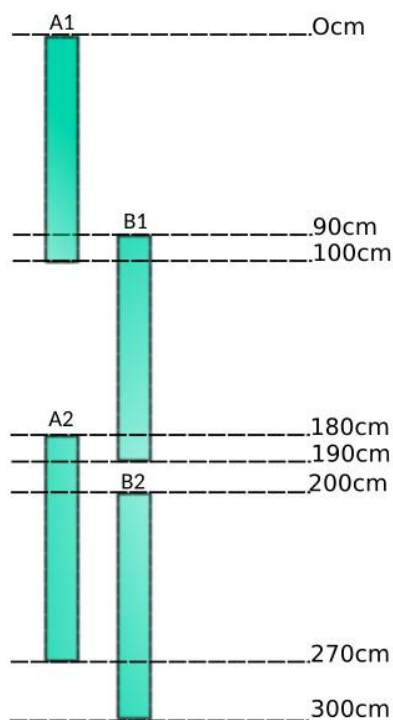


Figure 3. Méthode de réalisation du carottage

Datation au ^{14}C

Trois prélèvements, réalisés à 100, 200 et 300 cm de profondeur, ont été datés au ^{14}C . Les âges obtenus (BP) ont été étalonnés à l'aide du logiciel Calib ((Stuiver & Reimer, 1993) et de la base de données IntCal20 (Reimer et al., 2020). Le package Clam de R a été utilisé pour construire le modèle d'âge (Charieau & Larrieu, 2021).

Analyse PNP/profondeur

Les résultats ont été organisés en deux matrices : la première contient les types de PNP identifiés (*labels*) en fonction de la profondeur. La seconde matrice contient ces mêmes PNP en fonction de leurs caractéristiques écologiques (*cortèges*) : coprophiles, saprophiles ou aquatiques (algues). Ces matrices ont été traitées à l'aide du *package* Rioja avec R sous Rstudio. Tout d'abord, un diagramme des PNP les plus représentés, dont l'abondance était supérieure à 4000 grains sur l'intégralité de la carotte, a été réalisé avec R. La valeur de 4000 correspond à un seuil arbitraire pour définir les taxons dominants. Ces types n'ayant pas

d'écologie associée, nous avons réalisé par la suite un diagramme présentant la variation de la diversité des PNP et des cortèges au cours du temps. Pour ce faire, 22 PNP ont été sélectionnés d'après leur écologie saprophyte, coprophile ou aquatique (van Geel & Aptroot, 2006 ; Cugny et al., 2010). Les données en abondance ont été multipliées par les taux d'accumulation sédimentaire (D'Oliveira & Zitouni, 2021). Enfin, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) à l'aide du package Rioja sur le logiciel R, sur les huit échantillons de la carotte en sélectionnant les 22 mêmes types que précédemment (Fig. 4). Cette méthode d'analyse multivariée permet de réduire une table de données en quelques composantes principales qui décrivent le maximum de variance statistique de la base de données (Abdi & Williams, 2010).

RESULTATS

1- Taxons dominants

La Figure 5 présente les PNP les plus abondants sur les huit échantillons additionnés. La plupart de ces microfossiles ne sont présents que dans la première moitié de la carotte (0-3700 cal. BP). A 6200 cal. BP, seuls trois PNP ont été observés ; *Sordaria*, *Hdv_729*, et *Sporormiella*. Leur écologie est similaire, puisque ces trois PNP sont coprophiles. Enfin, les spores de *Geoglossum* font partie des spores les plus abondantes, puisqu'on en compte jusqu'à 14 000 par cm³. Leur écologie n'est pas connue à l'heure actuelle.

2- Evolution des trois grands cortèges au cours du temps

Parmi les 61 PNP trouvés, seuls 22 d'entre eux ont une écologie associée (Fig. 6 ; van Geel & Aptroot, 2006 ; Cugny et al., 2010). Ces derniers sont classés par cortèges : champignons coprophiles (6), champignons saprophytes (10) et algues (5). Les *Cercophora* ont un comportement à la fois coprophile et saprophyte.

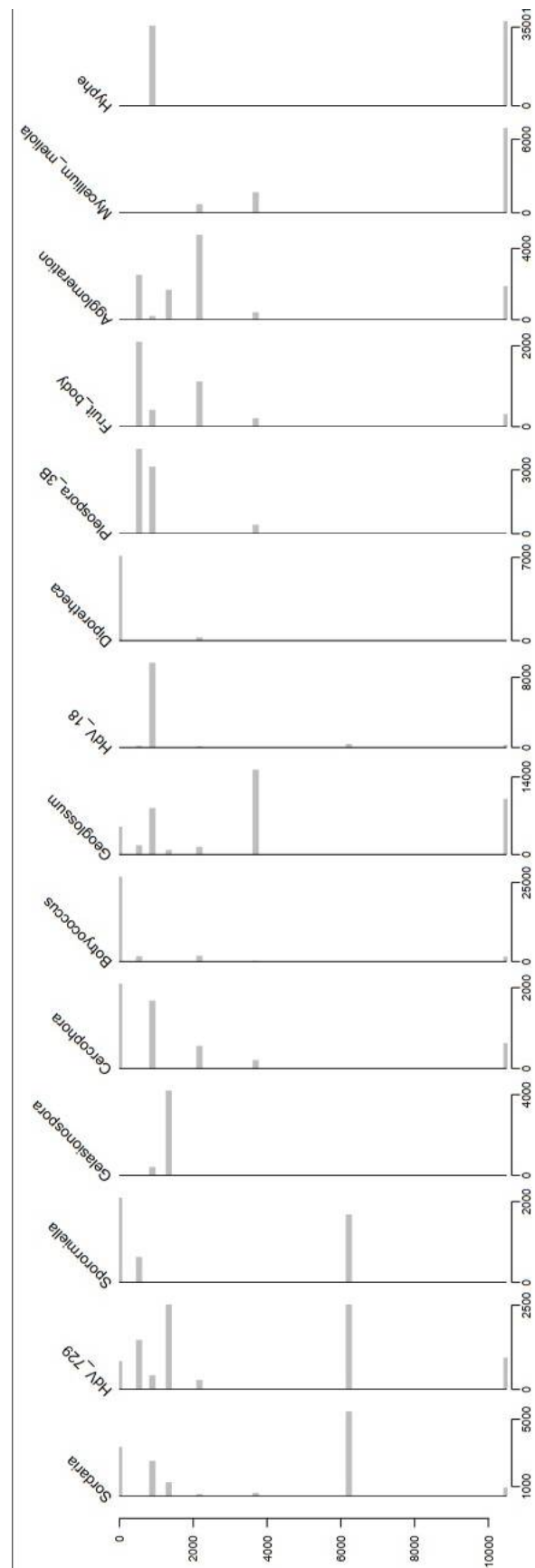


Figure 4. Diagramme des PNP les plus abondants (> 4000 PNP cumulés dans l'ensemble de la carotte)

Dans un premier temps, un diagramme d'abondance de ces trois cortèges a été réalisé. *Sordaria* et *Sporormiella* influencent fortement la courbe d'abondance des coprophiles, puisqu'ils suivent la même tendance. La même chose est observée pour les saprophiles, avec *Meliola*.

Les 10 000 ans étudiés ont été divisés en 4 phases :

Du Tardiglaciaire à 2800 cal. BP. Les courbes d'abondance des spores saprophiles et coprophiles augmentent légèrement, mais demeurent faibles. Les algues deviennent progressivement moins abondantes avant de disparaître presque complètement.

De 2800 à 1000 cal. BP. Le début de cette période est caractérisé par une absence de coprophiles et d'algues, et une très faible abondance de saprophiles. Les saprophiles sont toutefois marqués par un pic d'abondance de la spore *Gelasinospora*. Au cours de cette phase, les abondances et diversité des trois cortèges augmentent, jusqu'à ce que les saprophiles et les algues atteignent un pic pour l'échantillon daté à 1430-1270 cal. BP. Ce pic d'algues est lié à l'abondance de *Botryococcus*.

De 1000 à 300 cal. BP. Le début de cette période est marqué par une importante quantité de *Neurospora*. Par rapport à la phase précédente, la diversité et l'abondance de spores coprophiles commencent par diminuer, avant d'augmenter jusqu'à atteindre un pic d'abondance. Une importante quantité d'Hdv-729 est à noter. Les saprophiles et les algues diminuent légèrement.

De 300 cal. BP à aujourd'hui. La période récente est caractérisée par une légère augmentation d'abondance des spores saprophiles et des algues, tandis que la diversité de coprophiles diminue fortement. En revanche, les tendances de diversité sont à l'opposé des tendances d'abondance : quand l'abondance d'un cortège augmente, sa diversité diminue et inversement.

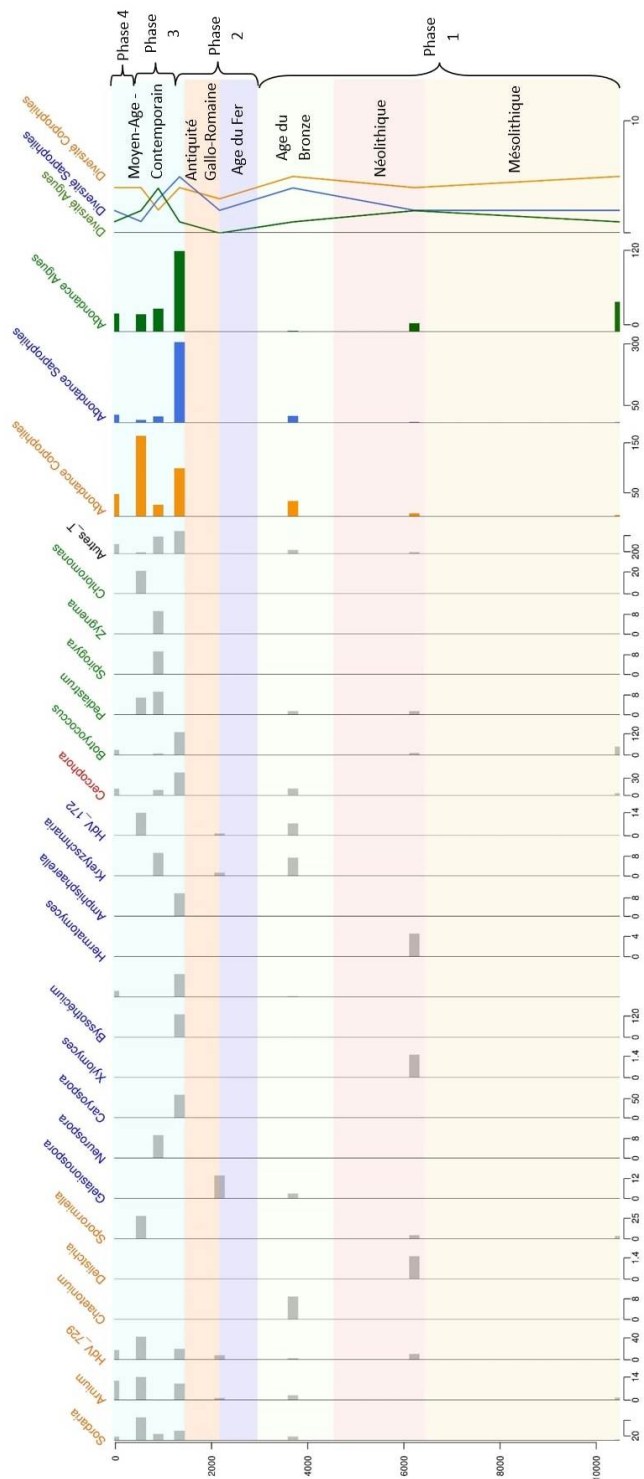


Figure 5. Diagramme d'abondance et diversité des cortèges principaux. Orange, spores coprophiles ; bleu, spores saprophiles ; rouge, spores coprophiles-saprophiles ; vert, algues ; noir, non défini. Les bandes correspondent aux périodes archéologiques dans la région.

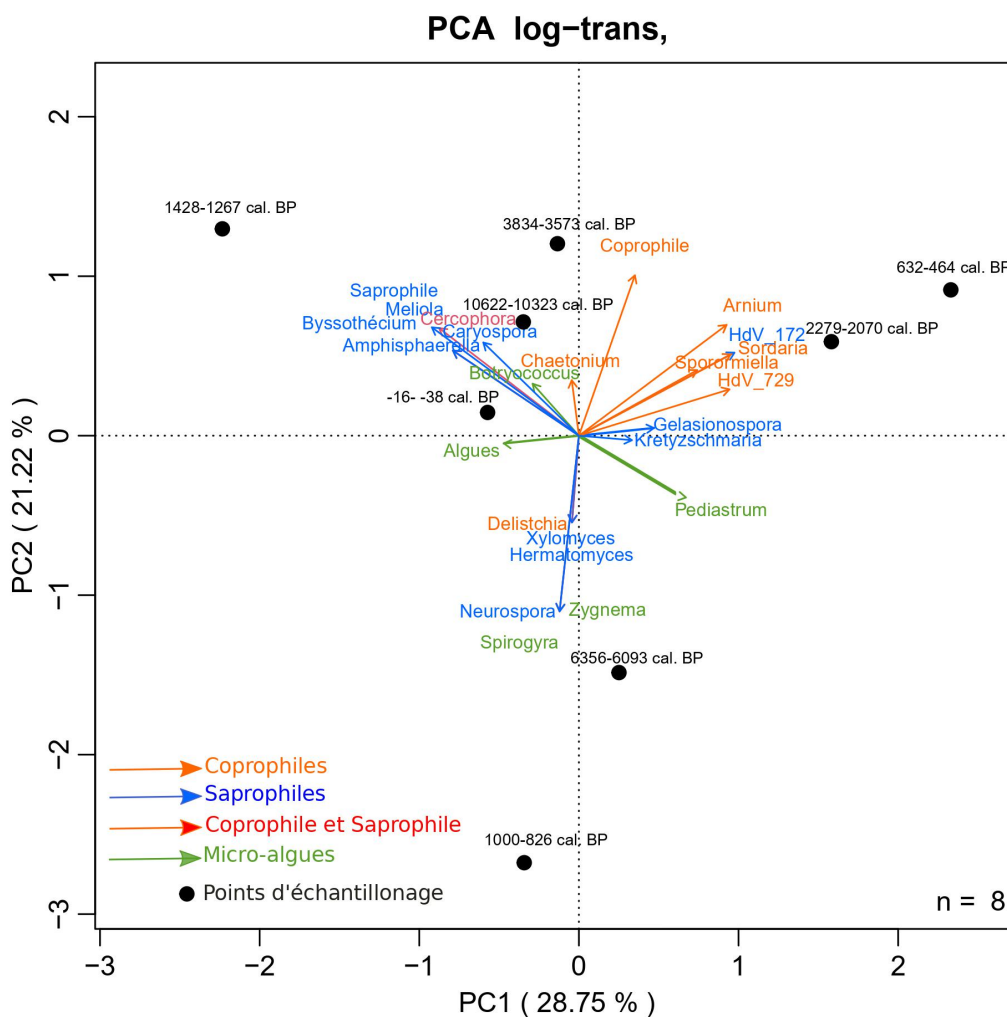


Figure 6. Analyse en Composantes Principales des différents cortèges et des 8 points d'échantillonnage. Les pourcentages d'inertie des axes 1 et 2 sont respectivement 28.7 et 21.2 %

3- Les comportements écologiques

L'ACP (Fig. 6) présente quatre zones, qui correspondent à des gradients avec des valeurs positives ou négatives. Les points d'échantillonnage qui se trouvent dans un même quadrant ont un comportement semblable, une écologie similaire. Trois groupes se distinguent :

- 2280-2070 et 630-460 cal. BP ;
- 10 620-10 320, 3830-3570, 1430-1270 cal. BP et actuel ;
- 6360-6090 et 1000-830 cal. BP.

On observe également que deux gradients se différencient : un gradient saprophyte/coprophile (PC1) et un gradient sécheresse/humidité (PC2). La distance entre l'origine et les points de niveaux d'échantillonnage repré-

sente la qualité de représentation de ces variables. Les variables éloignées de l'origine (630-460, 1000-830 et 1430-1270 cal. BP) sont donc bien représentées par l'ACP. Les spores coprophiles sont globalement regroupées dans la même zone (PC1 et PC2 positives), alors que les saprophytes et les microalgues sont plus dispersées. Enfin, la longueur des flèches indique l'influence des gradients PC1 et PC2 sur les différents PNP. Ici, les longueurs de flèches sont aléatoires et ne semblent pas avoir de lien avec le type de PNP.

DISCUSSION

L'évolution des cortèges de PNP montre quatre phases bien distinctes marquées par différentes tendances. Ces phases correspondent à des périodes historiques et

archéologiques qui ont marqué l'histoire de la région.

1- Phase 1 : du début de Mésolithique à la fin de l'Age du Bronze (10 650 - 2800 cal. BP)

La première phase débute à la fin de la période glaciaire (Tardiglaciaire), autour de 10 650 cal. BP (Jalut et al., 1982), période caractérisée par une augmentation globale des températures. Cette phase est marquée par une augmentation progressive de l'abondance des spores coprophiles et saprophiles, et une diminution de l'abondance d'algues.

L'échantillon daté du Mésolithique inférieur (10 620-10 320 cal. BP) présente une absence de spores coprophiles et saprophiles et une faible quantité d'algues. Les indicateurs de pâturage apparaissent au Néolithique, avant d'atteindre leur maximum à l'Age du Bronze. Leur apparition correspond au contexte de transition de chasseurs-cueilleurs nomades (Berridge & Roberts, 1986) vers une sédentarisation, liée la domestication et à la mise en place d'une économie agropastorale (Rhode et al., 2007). L'absence des saprophiles à la base de la carotte peut être expliquée par la lenteur de la reconquête végétale qui suit la période glaciaire.

Les algues déclinent au cours de cette phase, leur plus forte abondance correspondant à l'échantillon basal. Ceci pourrait s'expliquer par la présence de lacs postglaciaires (Dendievel et al., 2019b). La diminution de leur abondance jusqu'à l'Age du Bronze peut traduire le processus de terrestrialisation du lac préexistant (Dendievel et al., 2019b).

2 - Phase 2 : du début de l'Age du Fer au Haut Moyen-Âge (2800 - 1000 cal. BP)

La phase 2 est marquée par une augmentation très importante des trois cortèges, qui sont absents de l'échantillon daté à 2280-2070 cal. BP et connaissent une très forte augmentation au cours de l'Antiquité. L'échantillon 2280-2070 cal. BP présente un pic de *Gelasinospora*, spore indicatrice de feu

(van Geel & Aptroot, 2006). L'absence de saprophiles s'expliquerait donc en partie par des feux de forêt dans la région. Cette absence est confirmée par les analyses polliniques de Cartier et al. (2021), qui montrent à cette période une diminution des ligneux, ainsi qu'une baisse de la diversité végétale. De plus, l'augmentation des microcharbons indique des événements de défrichement et d'érosion (Dendievel et al., 2019b).

L'échantillon daté du Haut Moyen Âge (1430-1270 cal. BP) présente une forte abondance des trois cortèges. La présence des coprophiles (notamment HdV-729) suggère une reprise des activités pastorales (Cugny et al., 2010), ce que confirment des indices de pâturage trouvés dans la région (Servera Vives et al., 2014). L'abondance élevée de *Meliola* supporte cette hypothèse, puisque ce champignon est parasite de *Calluna vulgaris*, qui est liée aux activités pastorales (Dendievel et al., 2019b). Enfin, l'augmentation des spores saprophiles traduit la présence régionale de forêts (Mercuri et al., 2019).

3 - Phase 3 : du Haut Moyen-Âge à la fin de la Renaissance (1000 - 300 cal. BP)

La phase 3 est caractérisée par la diminution de l'abondance d'algues et de saprophiles, et par l'augmentation des coprophiles. L'abondance de ces derniers est toutefois en diminution par rapport à la phase 2. La transition entre ces deux phases est caractérisée par un déclin du pastoralisme à l'échelle régionale (Servera Vives et al., 2014). L'augmentation qui suit indique que l'activité pastorale était très présente dans la région à cette période, ce que confirment localement la présence de *Sordaria*, HdV-729 et *Sporormiella*.

La diminution des saprophiles est à mettre en lien avec le pic de *Neurospora* (spore indicatrice de feu), observé au début de cette phase. La région était alors dominée par la hêtraie-sapinière, qui est utilisée par les populations humaines pour produire du bois d'œuvre et de chauffe (Paradis-Grenouillet et al., 2011 ; Paradis-Grenouillet, 2012 ; Servera

Vives et al., 2014). La fin de la phase 3 (700-300 cal. BP) est située dans un contexte de changement climatique et de refroidissement global, le Petit Âge Glaciaire. La diminution de diversité des saprophiles pourrait être à la fois liée à ce changement climatique, qui s'ajoute à la dégradation anthropique des forêts. Les études menées dans la région montrent que les feux de forêt et la déforestation sont particulièrement importants à cette période (Stevenson & Rhodes, 2000 ; Valbuena et al., 2000 ; Surmely et al., 2009).

Enfin, des études polliniques (Montoya et al., 2010) et de PNP (de Beaulieu et al., 1982 ; Beyens & Meisterfeld, 2001 ; van der Knaap et al., 2011) ont montré que l'optimum climatique du Moyen-Age correspond à une période chaude, qui a pu entraîner une évaporation des eaux stagnantes et une régression des cortèges de microalgues (Montoya et al., 2010 ; van der Knaap et al., 2011).

4 - Phase 4 : de la fin de la Renaissance au présent (300 à -50 cal. BP)

Cette période se caractérise par une légère diminution de l'abondance des coprophiles, et par l'augmentation de l'abondance des saprophiles. La variation des saprophiles peut être attribuée à la reforestation des massifs cévenols de la fin du 19^e siècle (Saboulin Bollena, 1983 ; Curt et al., 2003). L'abondance des coprophiles confirme une activité pastorale importante durant les deux derniers siècles (Saboulin Bollena, 1983).

5- Limites et développements

L'application des PNP dans les études paléoenvironnementales est très récente. La majorité des articles datant du XXI^e siècle, la littérature reste réduite en comparaison d'autres marqueurs. Une des principales limites à cette étude concerne la difficulté d'identification de certaines spores. C'est le cas par exemple pour *Geoglossum*-type qui présente une morphologie commune et intègre probablement de nombreux taxons. Il serait intéressant de mesurer la taille de ces spores, afin d'étudier leur distribution en fonction de

leur longueur, et pouvoir comparer ces différentes distributions avec les assemblages associés afin d'en déduire une écologie (van Geel, 1978). Pour pallier ces difficultés d'identification, nous avons réalisé une clé dichotomique sous forme de carte mentale (Fig. 7). Cette clé permet d'identifier facilement les PNP les plus communs présents dans la tourbière du Peschio. Cependant, au regard de l'importante diversité de PNP existants, cette clé est limitée pour d'autres sites d'étude.

Si nous avons l'opportunité de réaliser à nouveau cette étude, nous réaliserions notre échantillonnage différemment. Comme la courbe de l'âge en fonction de la profondeur suit un modèle exponentiel, nous aurions pu faire réduire le pas d'échantillonnage avec la profondeur, afin que nos données soient mieux réparties le long des 10 000 ans. Nous aimerions combiner plusieurs méthodes. L'analyse combinée des PNP et d'autres indicateurs paléoenvironnementaux permet en effet de reconstituer de manière plus précise les paléoenvironnements.

CONCLUSION

Cette étude préliminaire apporte de nouvelles informations sur l'histoire des activités humaines et les dynamiques forestières sur le Mont Lozère. L'étude des cortèges de PNP renseigne ainsi sur l'évolution des paysages entourant la tourbière du Peschio depuis 10 000 ans. Elle révèle quatre phases dans l'histoire de la tourbière, et précise l'influence locale des activités anthropiques passées. Les résultats obtenus montrent ainsi l'expansion des forêts au début de l'Holocène et l'émergence de l'agropastoralisme au Néolithique. La période comprise entre l'Âge du Fer et le Haut Moyen-Âge est caractérisée par une augmentation des activités pastorales et des forêts. Du Haut Moyen Age à la fin de la Renaissance, des incendies anthropiques réduisent les forêts et les activités pastorales s'accroissent. Enfin, depuis la fin de la Renaissance, les données obtenues révèlent la reforestation de la fin du 19^e siècle. Les PNP permettent donc de comprendre l'utilisation des terres par les populations humaines (feux

de forêts, pâturage...). Cette étude montre également l'intérêt du couplage des marqueurs polliniques et des PNP. En effet, les reconstructions paléoenvironnementales peuvent être utilisées pour la gestion des Parc Naturels, grâce à la reconstruction de la végétation passée mise en regard de l'évolution de l'impact anthropique.

REFERENCES

- Aartolahti T. (1965). Oberflächenformen von Hochmooren und ihre Entwicklung in südwest Häme und Nord-Satakunta. *Fennia* 93 : 1-268.
- Abassi M. & Valensi P. (1998). Reconstitution de paléoenvironnements quaternaires par l'utilisation de diverses méthodes sur une communauté de mammifères - Application à la grotte du Lazaret. *Quaternaire*, 9 (4) : 291-302.
- Abdi H. & Williams L.J. (2010). Analyse en composantes principales. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2 : 433-459.
- Baker G.A., Bhagwat A.S & Willis K.J. (2013). Do dung fungal spores make a good proxy for past distribution of large herbivores? *Quaternary Science Reviews*, 62 : 21-31.
- Berglund B.E. & Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. In : B.E. Berglund (ed.), *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Chichester, UK, pp. 84-455.
- Berridge P. & Robert A. (1986). The Mesolithic Period in Cornwall. *Cornish Archeology*, 25 : 7-34.
- Beyens L. & Meisterfeld R. (2001). Protozoa: testate amoebae. In : J.P. Smol, H.J.B. Birks & W.M. Last (eds.), *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 3, Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 121-153.
- Blackford J.J. & Innes J.B. (2006). Linking current environments and processes to fungal spore assemblages: Surface NPM data from woodland environments. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 141 (1-2) : 179-187.
- Borromei A.M., Coronato A., Franzén L.G., Ponce J.F., López Sáez J.A., Maidana N. Rabassa J. & Soledad Candel M. (2010). Multiproxy record of Holocene paleoenvironmental change, Tierra del Fuego, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 286(1-2) : 1-16.
- Bouby L., Durand F., Rousselet O. & Manen C. (2018). Early farming economy in Mediterranean France: fruit and seed remains from the Early to Late Neolithic levels of the site of Taï (ca 5300–3500 cal bc). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28 : 17-34.
- Carcaillet C. & Vernet J.-L. (2001). Comments on “The Full-Glacial Forests of Central and Southeastern Europe” by Willis et al. *Quaternary Research*, 55 : 385-387.
- Charieau F. & Larrieu M. (2021). Dynamique des feux sur le Mont Lozère durant le dernier millénaire : étude des charbons de bois dans la tourbière du Peschio. *Orpalm Synthesis*, 14 (1) : 55-72.
- Cugny C., Mazier F. & Galop D. (2010). Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): The use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Vegetation History and Archaeobotany*, 19 : 391–408.
- Curt Starger J., Cumming B. & Meeker D.L. (2003). A 10,000-year high-resolution diatom record from Pilkington Bay, Lake Victoria, East Africa. *Quaternary Research*, 59 : 172-181.
- Davis O.K. & Shafer D.S. (2006). *Sporormiella* fungal spores, a palynological means of detecting herbivore density. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237 : 40-50.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1982). Recherches pollen analytiques sur l'histoire de la végétation de la bordure nord du Massif du Cantal (Massif Central, France). *Pollen et Spores*, 24 : 251-300.

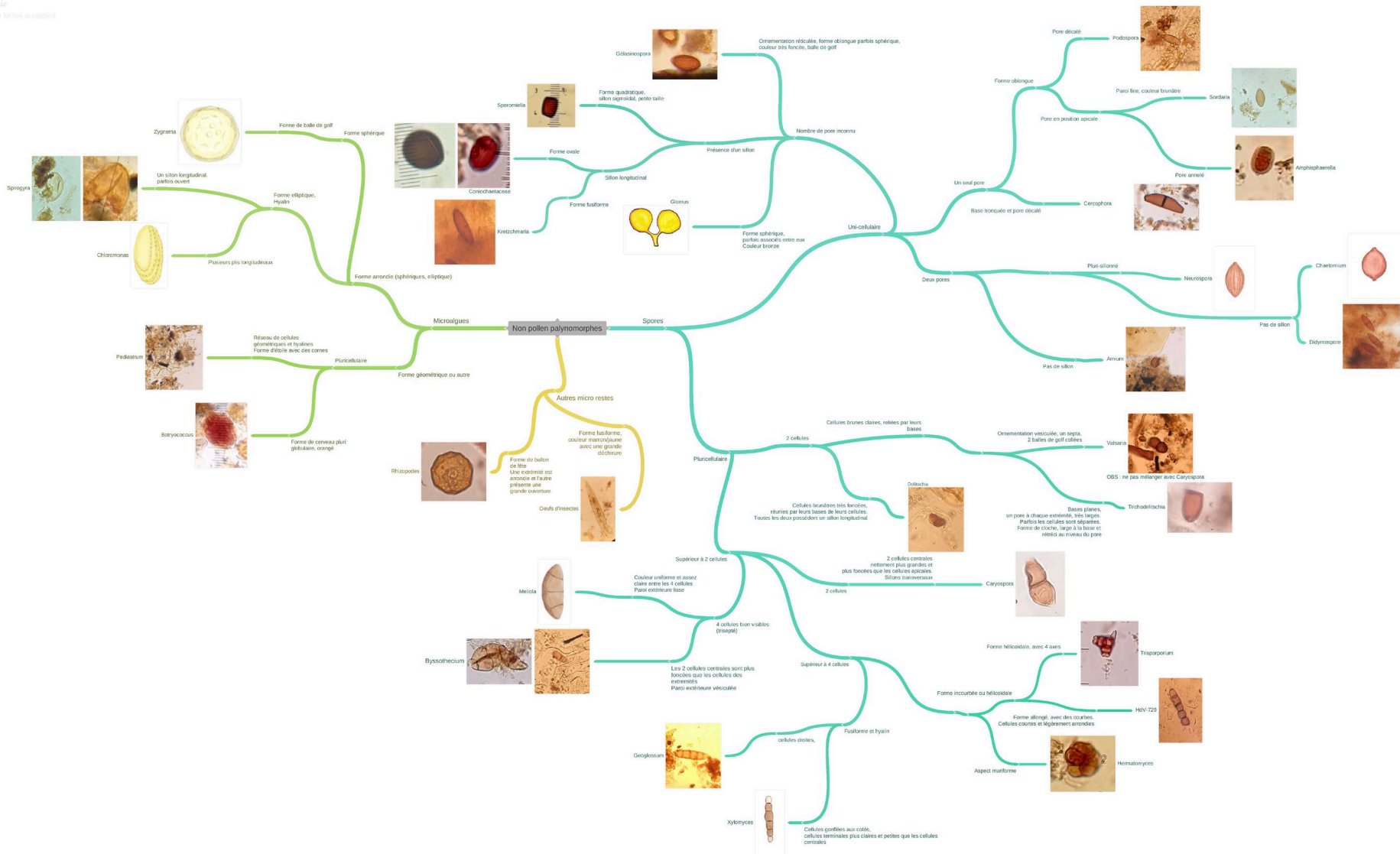


Figure 7. Clé d'identification dichotomique des PNP

- Dendievel A.-M., Serieyssola K., Dietre B., Cubizolle H., Quiquerez A. & Haas J.-N. (2019a). Late-Glacial and Early Holocene environmental changes affecting the shallow lake basin of La Narce du Béage (Ardèche, Massif Central, France). *Quaternary International*, doi.org/10.1016.
- Dendievel A.-M., Dietre B., Cubizolle H., Hajdas I., Kofler W., Oberlin C. & Haas J. N. (2019b). Holocene palaeoecological changes and agro-pastoral impact on the La Narce du Béage mire (Massif Central, France). *The Holocene*, 29 (6) : 992-1010.
- Faure E. (2012). "Hautes terres" : l'anthropisation des monts d'Aubrac et du Lézou (Massif Central, France) durant l'holocène : approche palynologique des dynamiques socio-environnementales en moyenne montagne. Thèse de Doctorat, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 339 p.
- Frey. D. (1960). The Ecological Significance of Cladoceran Remains in Lake Sediments. *Ecology*, 41 : 684-699.
- Gauthier E. & Richard H. (2009). Bronze Age at Lake Bourget (NW Alps, France): vegetation, human impact and climate change. *Quaternary International*, 200 : 111-119.
- Graham A. & Fretter V. (1962). British Prosobranch Molluscs: Their Functional Anatomy and Ecology. *Ray Society*, 144 : 755.
- Henry A.G. (2020). *Handbook for the Analysis of Micro-Particles in Archaeological Samples*. Berlin, Springer, 295 p.
- Jalut G., Delibrias G., Dagnac J., Mardones M. & Bouhours M. (1982). A palaeoecological approach to the last 21 000 years in the pyrenees: The peat bog of Freychinede (alt. 1350 m, Ariège, South France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 40 : 321-359.
- Jouffroy-Bapicot I., Petit C., Monna F. & Richard H. (2007). Evolution de la végétation du massif du Morvan : résultats des premières analyses polliniques et mise en évidence de l'impact des activités paléométallurgiques. *Bourgogne Nature*, 3 : 97-104.
- Mercuri A.-M., Florenzano A., Burjachs F., Giardini M., Kouli K., Masi A., Picornell-Gelabert L., Revelles J., Sadori L., Servera-Vives G., Torri P. & Fyfe R. (2019). From influence to impact: The multifunctional land use in Mediterranean prehistory emerging from palynology of archaeological sites (8.0-2.8 ka BP). *SAGE Publication*, 29 : 830-846.
- Milanesi C., Scali M., Vignani R., Cambi F., Dugerdil L., Faleria C. & Crest M. (2006). Archaeobotanical reconstructions of vegetation and report of mummified apple seeds found in the cellar of a first-century Roman villa on Elba Island. *Comptes Rendus Biologies*, 339 (11-12) : 487-497.
- Miola A. (2012). Tools for Non-Pollen Palynomorphs (NPPs) analysis: A list of Quaternary NPP types and reference literature in English language (1972-2011). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 186 : 142-161.
- Montoya E., Rull V. & van Geel B. (2010). Non-pollen palynomorphs from surface sediments along an altitudinal transect of the Venezuelan Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297 : 169-183.
- Paradis-Grenouillet S., Servera Vives G., Allée P., Miras Y. & Riera Mora S. (2011). Forest management and territorial practices during the Early Middle Ages in the medium mountain of Mont Lozère (France). A combined approach of charcoal and palynological analyses. *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia N Extra*, 11 : 115-116.
- Paradis-Grenouillet S. (2012). *Étude des forêts métallurgiques : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. Les exemples de forêts du Mont Lozère et du Périgord Limousin*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 452 p.
- Prager A., Barthelmes A., Theuerkauf M. & Joosten H. (2006). Non-pollen palynomorphs from modern Alder carrs and their potential for interpreting microfossil data from peat. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 141 : 7-31.

- Pulido Avila M. (2006). Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique post-glaciaire de la végétation dans le sud du Massif Central, France. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille, 308 p.
- Reimer P., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P., Ramsey B. C., Butzin M., Cheng H., Edwards L. R., Friedrich M., Grootes M. P., Guilderson P. T. & Hajdas I. (2020). The intCal20 Northern Hemisphere radiocarbon calibration curve (0-55 cal kPB). *Radiocarbon*, 62 : 725-757.
- Rhode D., Haiying Z., Madsen B. D., Xing G., Brantingham P.-J., Haizhou M. & Olsen J.-W. (2007). Epipaleolithic/early Neolithic settlements at Qinghai Lake, western China. *Journal of Archaeological Science*, 34 : 600-612.
- Rudolph K. (1917). Untersuchungen über den Aufbau böhmischer Moore. Aufbau und Entwicklungsgeschichte südböhmischer Hochmoore. *Abhandlungen der Kaiserlich-königlichen zoologisch-botanischen Gesellschaft*, 9 : 1-116
- Saboulin Bollen R. (1983). Les forêts de la Lozère. *Forêt Méditerranéenne*, 5 : 3-44.
- Servera Vives S.G., Miras Y., Riera S., Julià R., Allée P., Orengo H., Paradis-Grenouillet S. & Palet J.M. (2014). Tracing the land use history and vegetation dynamics in the Mont Lozere (Massif Central, France) during the last 2000 years: The interdisciplinary study case of Countrasts peat bog. *Quaternary International*, 353 : 123-139.
- Stevenson A.C. & Rhodes A.N. (2000). Palaeoenvironmental evaluation of the importance of fire as a cause for *Calluna* loss in the British Isles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164 : 195-206.
- Stuiver M. & Reimer P.J. (1993). Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- Surmely F., Miras Y., Guenet P., Nicolas V., Savignat A., Vannièrè B., Walter-Simonnet A.V., Servera Vives G. & Tzortzis S. (2009). Occupation and land-use history of a medium mountain from the Mid-Holocene: A multidisciplinary study performed in the South Cantal (French Massif Central). *Comptes Rendus Palevol*, 8 : 737-748.
- Valbuena L., Tárrega R. & Luis-Calabuig E. (2000). Seed banks of *Erica australis* and *Calluna vulgaris* in a heathland subjected to experimental fire. *Journal of Vegetation Science*, 11 (2) : 161-166.
- van der Knaap W.-O., Lamentowicz M., van Leeuwen J.F.N., Hangartner S., Leuenberger M., Mauquoy D., Goslar T., Mitchell E.-A.-D., Lamentowicz Ł. & Kamenik C. (2011). A multi-proxy, high-resolution record of peatland development and its drivers during the last millennium from the subalpine Swiss Alps. *Quaternary Science Reviews*, 30 : 3467-3480.
- van Geel B. (1972). Palynology of a section from the raised peat bog 'wietmarscher moor', with special reference to fungal remains. *Acta Botanica Neerlandica*, 21 : 261-284.
- van Geel B. (1978). A palaeoecological study of Holocene peat bog section in Germany and the Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 25 : 1-120.
- van Geel B. (2002). Non-Pollen Palynomorphs. In : Smol J.P., Birks H.J.B., Last W.M., Bradley R.S., Alverson K. (eds), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research*, vol 3. Springer, Dordrecht, pp. 99-121.
- van Geel B. & Aptroot A. (2006). Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia*, 82 : 313-329.
- Vegas-Vilarrubia T., Rull V., Montaya E. & Safont E. (2011). Quaternary palaeoecology and nature conservation: a general review with examples from the neotropics. *Quaternary Science Reviews*, 30 : 2361-2388.
- Walsh K., Court-Picon M., de Beaulieu J.-L., Guiter F., Mocchi F., Richer S., Sinet R., Talon B. & Tzortzis S. (2014). A historical ecology of the Ecrins (Southern French Alps): Archaeology and palaeoecology of the Mesolithic to the Medieval period.

Quaternary International, 353 : 52-73.

Wilmshurst J.-M., Wisser S.-K. & Charman D.-J. (2003). Reconstructing Holocene water tables in New Zealand using testate amoebae: differential preservation of tests and implications for the use of transfer functions. *The Holocene*, 13 : 61-67.

Yeloff D., Broeken P., Innes J. & van Geel B. (2007). Late Holocene vegetation and land-use history in Denmark: A multi-decadally resolved record from Lille Vildmose, northeast Jutland. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 146 : 182-192.